



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TUOMAS ERKKI OLAVI HEINONEN
LED-SOVELLUKSEN MATERIAALIPERÄINEN VIKAANTUMINEN
Diplomityö

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja
materiaalitekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 9. toukokuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Heinonen, Tuomas: LED-sovelluksen materiaaliperäinen vikaantuminen

Diplomityö, 58 sivua, 1 liite

Elokuu 2012

Pääaine: Muovit ja Elastomeerit

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen

Avainsanat: IP 67, LED, PC, PMMA, Primäärilinssi, Sekundäärilinssi, Valovirta, VOC

Tämän diplomityön tavoitteena on määrittää asiakastoiveen mukainen materiaali, jolla voidaan luoda IP67-luokan rakenne sekundäärilinssin ja LED-komponentin välille. Tämä toive on osoittautunut ongelmalliseksi, koska useiden materiaalien on havaittu vahingoittavan LED-komponenttia hermeettisessä ympäristössä. Vikaantumismekanismi on tuntematon.

Vikaantumista tutkitaan Design of Experiments –muuttuja-analyysin avulla. Analyysiin valitaan muuttujiksi adhesiivi, LED-komponentti, linssimateriaali ja juotosapuaaine, fluksi. Tutkimuksessa on tärkeää näytteiden huolellinen valmistaminen, jotta sekundäärilinssin ja piirikortin välinen rajapinta olisi tiivis, sekä lämpötilan hallinta tutkimuksen aikana.

Design of Experiments 1 –sarjan tuloksista havaitaan, että adhesiivinäyte on selkeästi merkittävin vikaantumiseen vaikuttava tekijä. Sarjassa tutkitaan viittä eri materiaalia, joista kolme osoittautuu turvalliseksi LED-komponentin toiminnan kannalta.

Design of Experiments 2 –sarja muodostetaan ensimmäisessä sarjassa vikaantuneista näytteistä. Sarja koostuu lämpö-, primäärilinssi-, loisteaine- ja väritutkimuksesta. Tämä diplomityö tarjoaa kolme materiaalia, joilla voi turvallisesti luoda LED-sovellukseen IP 67 –luokituksen mukaisen rakenteen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

HEINONEN, TUOMAS: Material derived failure in LED-application

Master of Science Thesis, 58 pages, 1 Appendix pages

August 2012

Major: Plastics and Elastomers

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen

Keywords: IP 67, LED, Luminous flux, PC, PMMA, Primary optics, Secondary optics, VOC

LED-components (Light-Emitting Diodes) have revolutionized the 21st century electronic and lighting industry. LEDs have far lower consumption of energy and longer life cycle when compared to a traditional light bulb. The biggest problem related to development of the LEDs is the lack of knowledge on how the complex emission mechanism functions.

Commercial LEDs have a life cycle of about 50 000 hours. In some cases the LED can malfunction in the early stage of the cycle, after having exceeded 1 000 hours in operation, losing even more than 90% of its luminous flux. This phenomenon can be witnessed when the LED is in a hermetic state and a foreign material, such as a drop of glue or a piece of tape, is located in the vicinity of the LED. This thesis studies the reasons and the effects behind the premature failure of the LEDs.

This thesis consists mostly of experimental analysis which is performed by the Design of Experiments – variable statistical tool. With the help of this method it is possible to recognize the variables which have the lowest and the highest effects in the failure process.

The results obtained from Design of Experiments 1 indicated that the premature failure is due to the adhesive material used in the LED-application. The potential failure-inducing variables studied in the Design of Experiments 1 were adhesive material, lens material, LED-component and flux.

Design of Experiments 2 –analysis was put together from the failed samples of Design of Experiments 1. The analysis consisted of heat-, primary lens-, phosphor- and color research.

One key objective of this thesis was to find a safe adhesive whereby it is possible to create IP67-rated structure safely for the LED-application. This thesis provides three adhesive materials which meet the above requirements.

ALKUSANAT

Vuonna 2005 lukion taaksejättäneenä ajatukset olivat kaikkialla muualla kuin jatko-opinnoissa. Armeija ja työelämä olivat lähitulevaisuuden suunnitelmissa. Kaikki kuitenkin muuttui isoäitini Martta Oksasen kuullessa välivuosi-suunnitelmistani ja antoi metaforallisesti tuntuvaan potkaisun takapuoleen. Kyseinen potku lennätti nuoren miehen syksyllä vuonna 2006 Tampereen teknilliseen yliopistoon asti.

Ensimmäiset opiskeluvuodet sujuivat lievässä vastatulessa. Koulutusalan ja yliopiston valinta herätti epäilyksiä, eikä opintomenestyskään ollut halutulla tasolla. Suurin kiitos kuuluu perheelleni ja opiskelijaystäväilleni, joiden tuella jatkoin sitkeästi valitsemaani tiellä.

Maaliskuussa 2012 opiskelijaurani pelottavin haaste oli käsillä; diplomityö. Kyseinen työ oli opiskeluaikani tabu, jonka herättämät negatiiviset ajatukset onnistuin lahjakkaasti torjumaan. Tämä kaikki tulisi kuitenkin muuttumaan maaliskuussa 2012, jolloin salolainen yritys LEDiL Oy yllättäen tarjosi haastavaa projektia. Haluankin nyt mainita erityiskiitoksen LEDiL Oy:n hallitukselle, henkilökunnalle sekä erityisesti Jyrki Kuusistolle ja Juha Röyhkiölle, jotka näkivät toivon pilkahduksen pelokkaan nuoren katseessa.

Tämä diplomityö, kaikista kauhukuvista huolimatta, osoittautui ehdottomasti mielenkiintoisimmaksi projektiksi koko opiskelijaurani ajalta. Tästä on hyvä jatkaa eteenpäin, yhtä kokemusta rikkaampana.

Salossa 21.08.2012

Tuomas Heinonen

SISÄLLYS

Alkusanat	iv
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	8
2 LEDiL Oy	9
2.1 Yritysfilosofia	9
2.2 Tuotteet	10
3 LED	11
3.1 Valkoinen LED	11
3.2 LED-sirut	13
3.3 Loisteaineet	16
3.4 Primäärilinssi	16
3.5 Jäähdytys-elementit	17
4 Ongelman määrittäminen	20
4.1 Ongelman määrittäminen ja kuvaus	20
4.2 Ongelman toimintamekanismi	21
5 Testausmenetelmä	24
5.1 Alkuasetelma	24
5.2 Testaus	25
5.3 Testauksen päätös	27
5.4 Upotustesti	27
6 Vikaantumiseen vaikuttavat tekijät	28
6.1 Materiaalit	28
6.2 Menetelmä	29
6.3 Ympäristö	30
6.4 Yksilö	30
6.5 Välineet	31
7 Design Of Experiments 1	32
7.1 Suunnittelu	32
7.2 Design of Experiments 1 –täydennyssarja	36
7.3 Tulosten analysointi	37
7.3.1 Muuttujien vaikutus vikaantumisessa	37
7.3.2 Muuttujien yhteisvaikutus vikaantumisessa	40
7.3.3 Täydennyssarja	43
7.3.4 Toipumistesti	44
7.3.5 Vikaantuneiden näytteen sähköteho	44
7.3.6 Upotustesti	45
8 Design of Experiments 2	46
8.1 Suunnittelu	46

8.2	Tulosten analysointi	50
8.2.1	Lämpötutkimus	50
8.2.2	Primäärilinssitutkimus	51
8.2.3	Loisteainetutkimus.....	52
8.2.4	Väritutkimus	52
9	Johtopäätökset.....	53
9.1	Yhteenveto	53
	Lähteet.....	55

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

LED	Valoa emittoiva diodi (engl. Light-Emitting Diode), pn-liittymä komponentti, joka emittoi optista säteilyä ajettaessa sähkövirtaa komponentin läpi [Roedel 2003]
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti, termoplastinen polymeeri, kirkas, väritön, kutsutaan myös akryyliksi
PC	Polykarbonaatti, termoplastinen polymeeri
UL94	Underwriters Laboratories:in luoma polymeerien palonkestostandardi
UV	Polymeerien ultraviolettisäteilyn kesto-ominaisuus
Valovirta	Suure, joka kuvaa valolähteen säteilyn määrää tiettyyn avaruuskulmaan, SI-yksikkö [lm]
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste (engl. Volatile Organic Compound); orgaaninen yhdiste, jonka kiehumispiste on 101.3 kPa paineessa 250°C tai alle. [Euroopan Unioni]

1 JOHDANTO

LED-komponentit ovat mullistaneet 2000-luvun elektroniikka- ja valaisinteollisuuden. Niiden käytön yleistyminen perustuu pitkälti taloudellisiin etuihin ja kuluttajien yhä enenevässä määrin arvostamiin vihreisiin arvoihin. Verrattaessa etuja tavanomaiseen hehkulamppuun LED-komponentit tarjoavat moninkertoin energiaystävällisemmän ja -tehokkaamman ratkaisun valaisinsovelluksissa. LED-komponenttien kehitys on kuitenkin vielä elinkaarensa alkuvaiheilla, koska komponentin emission syntymekanismi on erittäin monimutkainen ja vaikeasti ymmärrettävä. Tämä luonnollisesti hidastaa toimialan kehitystä ja rajoittaa kaupallisten sovellusten käyttökohteita.

Merkittävimmät LED-komponentteihin liittyvät ongelmat ovat lämpöenergian synty ja komponentin rajallinen elinkaari. Sovellukset vaativat usein tehokkaan jäähdytyksen, koska puolijohdemateriaaleilla on rajallinen lämmönkesto. Kaupallisissa komponenteissa käytetyt puolijohdemateriaalit eivät kestä toimintakykyisinä kuin keskimäärin 50 000 tuntia. Tässä työssä tutkitaan komponenttien vikaantumista, joka tapahtuu, kun komponentti on ollut aktiivisena noin 2% koko elinkaarestaan. Tänä aikana komponentti on menettänyt 10% tai enemmän alkuperäisestä valovirran arvostaan.

Komponenttien vikaantumismekanismi on tuntematon, mutta vikaantuminen havaitaan, kun komponentti on suljetussa tilassa ja sen välittömässä läheisyydessä on vierasta materiaalia, kuten liimaa tai teippiä. Edeltävästä voidaan päätellä, että vikaantumisilmiö on mahdollisesti materiaaliperäinen.

Vikaantumistutkimuksessa sovelletaan Design of Experiments –muuttuja-analyysia, jossa määritetään tiettyjen muuttujien ja muuttujakombinaatioiden roolia vikaantumisessa. Tutkimuksessa pyritään paikantamaan vikaantuminen ja päättämään millainen vikaantumismekanismi taustalla vaikuttaa.

Vikaantumisilmiö on toimialalla yleisesti tiedossa ja sen tutkimiseen on ottanut osaa useampi alalla toimiva yritys. Tästä syystä tutkimuksen tulokset ovat erittäin merkityksellisiä ja tulevat vaikuttamaan sekä LED-komponenttivalmistajien että valaisinvalmistajien tulevaisuuden toimintaan.

2 LEDIL OY

LEDiL Oy on Hannu Hukkasen ja Tomi Kuntzen vuonna 2002 perustama LED-optiikan komponenttivalmistaja ja asiantuntijayritys. Myöhemmin yritykseen liittyi osakkaaksi nykyinen toimitusjohtaja Rami Huovinen. LEDiL Oy on viime vuosina kasvanut selkeästi kilpailijoitaan nopeammin tulorahoituksen myötä. Tästä syystä yrityksen velkaantumisaste on pieni. [LEDiL Oy 2012]

LEDiL Oy:n tuotteita valmistetaan Suomessa ja Kiinassa tutkimus- ja tuotekehitystyön keskittyessä Suomeen. Yrityksen markkina-alue kattaa kaikki mantereet, pääosin Euroopan, Yhdysvallat ja Aasian. [LEDiL Oy 2012]

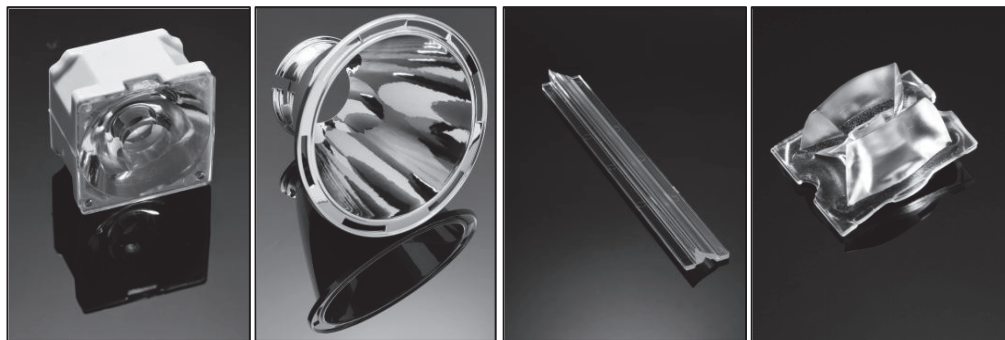
2.1 Yritysfilosofia

LEDiL Oy:n nopea kasvu ja menestys perustuu erinomaiseen liikeideaan ja ajoitukseen. Ajoitus on ideaalinen, koska toimiala on edelleen murrosvaiheessa. Yrityksen tukipilareita ovat vahva tutkimus- ja tuotekehitystyö sekä tehokas globaali myynti. Yhdeksi tärkeimmäksi toiminnalliseksi arvoksi on määritetty asiakaslähtöisyys. Asiakkaan asettamat vaatimukset koetaan haasteina, joihin pyritään vastaamaan. Toisin sanoen LEDiL Oy on onnistunut integroimaan asiakkaansa osaksi suunnitteluprosesseja. Asiakkaalle pyritään tarjoamaan tuotteiden ohella teknistä tukea, simulaatioita, fotometristä dataa, mekaanisia 3D-malleja ja standardilinssikohtaisia piirikorttikonfiguraatioita. [LEDiL Oy 2012]

LEDiL Oy on saanut osakseen paljon huomiota mediassa ja voittanut lukuisia yrityspalkintoja kotimaassaan Suomessa. Vuonna 2004 LEDiL Oy saavutti 3. sijan Varsinais-Suomen Innosuomi-kilpailussa, mutta vuosi 2011 oli kuitenkin merkittävin kilpailumenestyksen osalta. LEDiL Oy palkittiin kyseisenä vuonna mm. Ernst & Young Entrepreneur of the year -Länsi- ja Varsinais-Suomen aluekilpailun voittajana sekä Kauppalehden vuoden suomalaisena kasvuyrityksenä. Suomen Asiakastieto Oy palkitsi LEDiL Oy:n Varsinais-Suomen vahvimpana yrityksenä. Samana vuonna Varsinais-Suomen yrittäjät ry palkitsi LEDiL Oy:n Rose-linssin vuoden tuotteena ja itse yrityksen vuoden yrittäjänä. [LEDiL Oy 2012]

2.2 Tuotteet

LEDiL Oy:n tuotteet ovat pääosin PC:stä ja PMMA:sta ruiskuvalulla valmistettuja LED-valaisinsovelluksiin suunniteltuja linssejä, heijastimia ja linssin pidikkeitä. Tuoteportfolio pitää sisällään yli 1200 standardituotetta, joita voidaan soveltaa yli 10 eri LED-valmistajan komponenteille. LEDiL Oy:n tuotteita on myös mahdollista räätälöidä kullekin asiakkaalle heidän tarpeitaan ja sovelluksiaan vastaavaksi. LEDiL Oy:n valaisinoptiikkaa käytetään ympäri maailmaa esimerkiksi katu-, turva-, julkisivu-, toimisto- ja sisätilojen yleisvalaistuksessa. Kuvasarjassa 1 on esitelty eräitä LEDiL Oy:n tuotteita. [LEDiL 2012]



Kuvasarja 1: LEDiL Oy:n tuotteita [LEDiL Oy 2012]

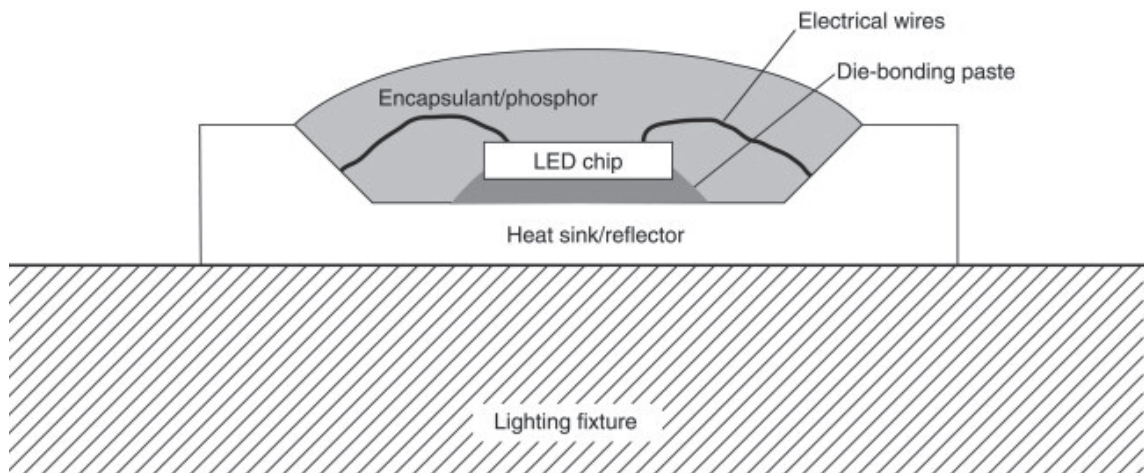
3 LED

LED eli valoa emittoiva diodi (engl. light emitting diode) on pn-liittymäkomponentti, joka emittoi optista säteilyä ajettaessa sähkövirtaa komponentin läpi. Säteily syntyy spontaanilla rekombinaatiomekanismilla; erona laser-sovellukseen, jossa säteily syntyy stimuloidulla rekombinaatiolla. LED-emissio on tavallisesti epäjohdonmukaista pitäen sisällään laajan viivaleveyden. Emissioenergia riippuu käytettävän puolijohdemateriaalin energiavyön arvosta. LEDin synnyttämää sähkömagneettisen säteilyn aallonpituutta voidaan siis muuttaa eri puolijohdemateriaaleilla. [Roedel 2003]

LED-sovellukset lisääntyvät huimaa vauhtia niiden nopean kehityksen myötä. Tällä hetkellä LED-komponentteja voidaan tavata infrapunasovelluksissa, kuten signaalijärjestelmissä, optoelektronisissa järjestelmissä ja optisessa kommunikaatiossa. Muita sovelluksia ovat esimerkiksi digitaaliset näytöt, sensorit ja osoittimet. [Roedel 2003]

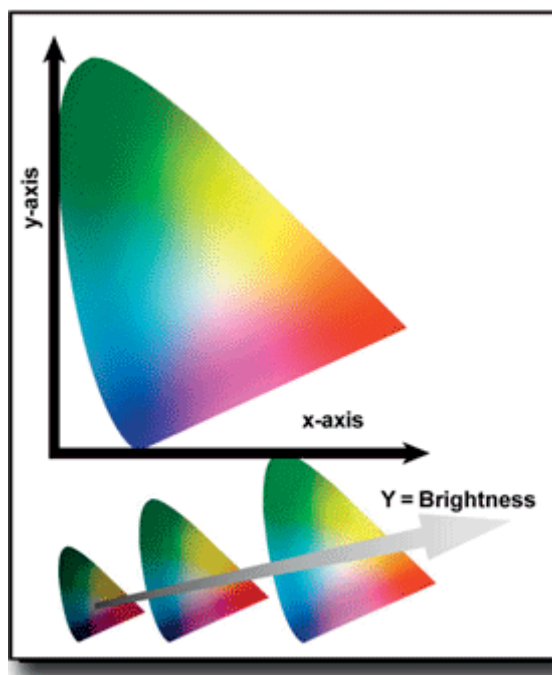
3.1 Valkoinen LED

Yksinkertaisin tapa muodostaa valkoista valoa emittoiva LED on yhdistää päävärien LED-siruja yhteen erillisten virtapiirien avulla. Tämä menetelmä on kallis ja epäkäytännöllinen eikä edeltävää ratkaisua myöskään ymmärretä valkoisena LEDinä nykypäivän sovelluksissa. Kaupallisesti merkittävin tapa muodostaa valkoista valoa on käyttää loisteainetta (engl. phosphor), jonka avulla esimerkiksi monokromaattinen sininen LED-valo muutetaan valkoiseksi. Kuvassa 2 on esitetty valkoisen LEDin poikkileikkauskuva, jossa valkoinen valo on synnytetty loisteaineen avulla. Jäähdytys-elementit (engl. Heat sinks) tulivat tarpeellisiksi suuritehoisten LEDien myötä. [Masui, Nakamura 2010]



Kuva 2: Poikkileikkauskuva; Valkoinen suurteho-LED [Masui, Nakamura 2010]

Kaupallisesti käytetyin väriyhdistelmä valkoiselle LEDille on sinikeltainen kombinaatio. Tämä väri on mahdollista saavuttaa LEDillä, jonka sirun puolijohdemateriaalina käytetään InGaN:ia (engl. Indium gallium nitride) ja loisteaineena YAG:ta (engl. Yttrium-aluminum garnet). InGaN emittoi voimakkaasti sinisen valon aallonpituutta ja samalla aktivoi YAG-loisteaineen, joka puolestaan emittoi keltaista valoa. Tuloksena on valkoinen valo. Sinikeltaisella kombinaatiolla synnytetty valkoinen valo tuottaa korkeimman tehosuhteen verrattuna muihin dikromaattisiin yhdistelmiin. Tällä menetelmällä valkoisen valon synnyttäminen ja ylläpitäminen on suhteellisen helppoa. Kuvassa 3 on esitetty kromaattisuuskaavio, joka havainnollistaa valkoisen valon syntyä. [Masui, Nakamura 2010]



Kuva 3: CIE kromaattisuuskaavio; X- ja Y-arvo yhdessä määrittävät LEDin kromaattisuuden. Y-nuoli kuvaa kirkkauden kasvusuuntaa. [London South Bank University 2011]

Eräs tapa muodostaa valkoista valoa on käyttää useita loisteaineita ja aktivoida ne UV-LEDillä. Kyseinen tapa parantaa värien hallintaa ja spektriä dikromaattisiin LEDeihin nähden. Ongelmana edeltävässä rakenteessa on UV-LEDien ja loisteaineiden riittämätön kvanttitehokkuus muodostaa fotoneja. [Masui, Nakamura 2010]

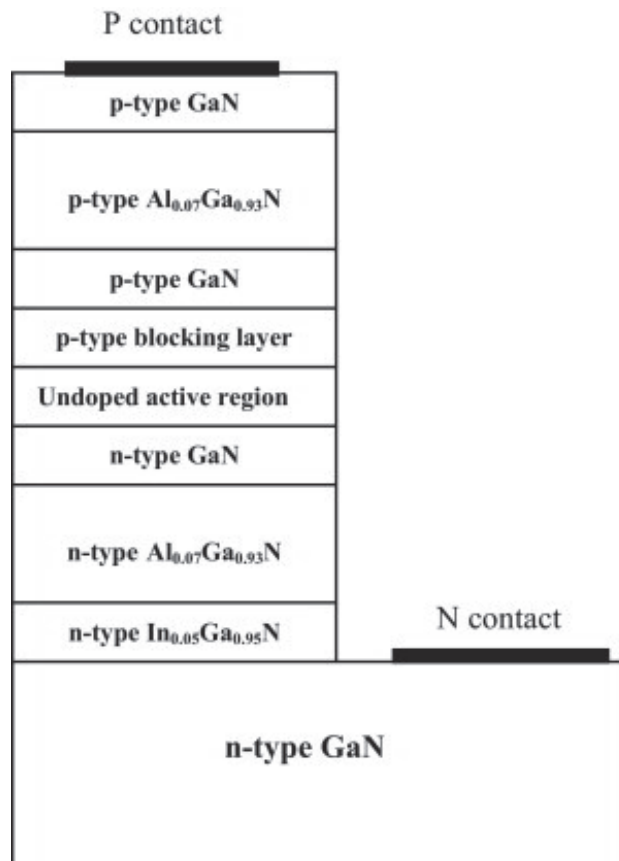
Valkoisen LED-sirun suunnittelussa on tärkeää maksimoida säteilyhyötysuhde, valotehokkuus ja värintoistoindeksi. Valotehokkuus tarkoittaa valovirran suhdetta kulutettuun sähkötehoon. Loppukäyttäjän näkökulmasta tärkeintä on LEDin elinikä ja energiankulutus. LED-sirun lämpeneminen vaikuttaa negatiivisesti edellä mainittuihin ominaisuuksiin, siksi jäähdytyslementtien rooli on tärkeä. [Žukauskas 2002] Jäähdytyslementteihin perehdytään tarkemmin kappaleessa 3.5.

3.2 LED-sirut

LED-siruissa käytettävä InGaN-yhdiste on tällä hetkellä ainut kaupallinen puolijohdemateriaali, jolla voidaan synnyttää tarpeeksi lyhyttä aallonpituutta aktivoimaan loisteaineita. ZnSe- ja ZnO-pohjaisia puolijohdemateriaaleja on tutkittu, joista jälkimmäinen on osoittanut lupaavia ominaisuuksia, vaikka tutkimustyö on vielä kesken. ZnSe-puolijohdemateriaali osoittautui mekaanisilta ominaisuuksiltaan liian heikoksi komponentiksi LED-sovelluksiin. InGaN-pohjaiset siniset LEDit ovat erittäin tehokkaita kvantti-hyötysuhteeltaan arvon ollessa kaupallisella tasolla noin 80%.

[Masui, Nakamura 2010] InGaN-sirut kasvatetaan tavallisesti toisen materiaalin, esimerkiksi safiirin tai piikarbidin, päällä, jolloin dislokaatiot ovat väistämättömiä [Chichibu 2006].

Kuvassa 4 on esitetty InGaN-LEDin rakennekuva. Rakenteessa fotonit syntyvät InGaN/GaN tai InGaN/AlGaN kvanttikaivossa [Abdullah, Ibrahim 2012].



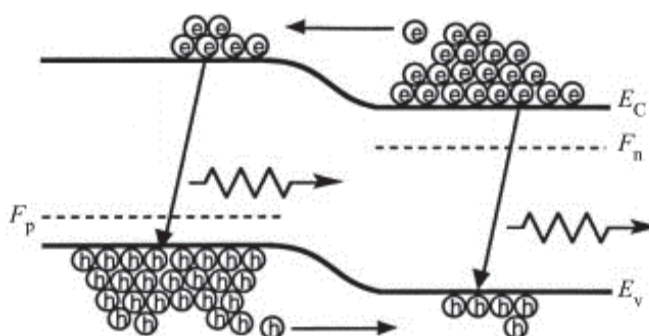
Kuva 4: InGaN-LED; rakenne [Abdullah, Ibrahim 2012]

InGaN-puolijohdemateriaalin toiminta perustuu materiaaliin johdetun sähköenergian muutokseen sähkömagneettiseksi säteilyksi, optiseksi energiaksi. Ilmiö on nimeltään elektroluminesenssi. [Roedel 2003]

Kun virtaa syötetään pn-liitokseen, enemmistö kantaja-elektroneista siirtyy n-tasolta p-tasolle. P-tasolla elektronit muuttuvat ylimääräisiksi vähemmistö-elektroneiksi. Virran kulkeutuessa p-tasolta n-tasolle p-tason ylimääräiset aukot toimivat ylimääräisinä varauksenkuljettajina. Näiden kuljettajien tiheys on suurempi kuin niiden tasapainoarvo olisi, joten termodynamiikka säätelee kuljettajat molemmille puolille liitoksia. Tapahtuma on esitetty kuvassa 5. Kuljettajien rekombinoituessa ja liikkeessa liitoksien välillä ne vapauttavat kineettisen- ja potentiaalienergiansa. Emissiorekombinaatiossa johtavuusvyön elektroni putoaa valenssivyön aukolle [Jahkonen 2009]. Yhden elektroniaukon rekombinaation energia voi luoda fotonin tai hajaantua ympäröivään hilaan. Hilaan hajaantunut energia muuttuu näkyvän valon sijaan lämpöenergiaksi, ts.

fononeiksi [Jahkonen 2009]. Fotonien emittoitumisasteen suhde kaikkien rekombinaatioiden synnyttämään energiaan määrittää puolijohdemateriaalin kvanttitehokkuuden. [Roedel 2003]

Elektronin ja aukon välinen potentiaalienergiaero on energiavyön suuruinen (engl. bandgap). Kuljettajien kineettiset energiat ovat suhteellisen pieniä. Tästä syystä syntyvien fotonien energia on hyvin lähellä energiavyön arvoa. Kullakin puolijohdemateriaalilla on oma spesifinen energiavyön arvo, siksi LEDin emittoiman säteilyn aallonpituus on riippuvainen käytetystä puolijohdemateriaalista. [Roedel 2003]



Kuva 5: Elektronien ja aukkojen kulkeutuminen pn-liittymän välillä [Roedel 2003]

Lähestyttäessä UV-säteilyn aallonpituusalue (380-400nm) LED-sirun kvanttitehokkuus laskee huomattavasti [Masui, Nakamura 2010]. Kyseistä aallonpituusaluea vastaaville puolijohdemateriaaleille on tyypillistä alhaisempi Indium-konsentraatio kuin sinistä valoa emittoivalla puolijohdemateriaalilla. Indium-pitoisuus on näin ollen avainasemassa määrittäessä materiaalin kvanttitehokkuutta. [Chichibu 2006] Indiumittomat GaN-materiaalit ovat kaupallisesti saatavilla, mutta liian korkeat materiaalikustannukset rajoittavat sovelluskäyttöä. Tästä syystä GaN-kiteiden kasvattamiseen liittyviin tutkimuksiin käytetään runsaasti resursseja. [Hashimoto 2007]

Puolijohdemateriaalin synnyttämät fotonit eli valokvantit ohjataan sovelluksen vaatimalla tavalla ulos materiaalista. Osa fotoneista jää kuitenkin puolijohdemateriaalin sisälle [Schubert 2006]. Ilmiötä voidaan kompensoida karhentamalla puolijohdemateriaalin pintaa tai muokkaamalla sirun geometriaa. Sirun kapselointi hartsilla voi johtaa parempaan refraktio-indeksiin. [Masui, Nakamura 2010]

Suuritehoisissa valaisinsovelluksissa pyritään optimoimaan sirun pinta-ala mahdollisimman suureksi valotehon kasvattamiseksi. Tämä johtaa säästöihin valmistuksessa ja raaka-aineissa. Ajettaessa siruja suurilla virran arvoilla niiden hyötysuhde laskee etenkin InGaN-puolijohdemateriaalien kohdalla. Syy edeltävään on tuntematon. [Masui, Nakamura 2010]

3.3 Loisteaineet

Ceriumilla lisääineistettu YAG on loisteaineista eniten käytetty valkoisen LEDin sovelluksessa, koska sinikeltainen yhdistelmä tuottaa parhaan tehokkuuden valkoiselle valolle. Valkoisen valon laatu ei kuitenkaan ole tällöin aina paras mahdollinen. Sisävalaistuksessa vaaditaan usein lämpimiä valkoisen sävyjä. [Narukawa 2007]

Sinisellä aallonpituudella aktivoituvien loisteaineiden määrä on kaupallisella tasolla vähäinen. UV-emissiolla aktivoituvien loisteaineiden määrä on puolestaan runsas, mutta UV-emission sovelluskohteet ovat rajalliset. Loisteaineet, jotka aktivoituvat sinisestä valosta ja emittoivat vihreää sekä punaista valoa, ovat suuren mielenkiinnon kohteita. [Masui, Nakamura 2010] Edeltävien kaltaisia tutkittuja puolijohdemateriaaleja ovat esimerkiksi SiAlON (engl. kutsumanimi Sialon) ja CaAlSiN (engl. kutsumanimi Caalsin) [Xie, Hirotsaki 2007]. Näiden materiaalien tuomiin etuihin kuuluu mm. parempi kemiallinen ja terminen stabiilius sekä puolijohdemateriaalien koostumuksen monipuolisempi suunnittelu. [Masui, Nakamura 2010]

Loisteainepartikkeleita pyritään käyttämään myös nanokoossa LED-sovelluksissa. Kaupallisten loisteaineiden ongelmana on muodostaa tarpeeksi homogeeninen valkoinen emissio valolähteestä. Tällöin loisteaineen soveltaminen puolijohdemateriaalille vaatii erittäin tarkkoja menetelmiä. [Masui, Nakamura 2010]

3.4 Primäärilinssi

Primäärilinssin (engl. encapsulant, primary lens) tärkeimmät tehtävät ovat mukauttaa ja ohjata valon emissiota sekä suojata puolijohdemateriaalia ympäristöltä. Primäärilinssin tulisi suojata myös mekaaniselta rasitukselta. Epoksi-pohjaiset primäärilinssit ovat olleet laajalti käytössä. [Morita 2008]

Suuri osa Epokseista reagoi UV-LEDien emissioon rappeutumalla ja haalentumalla, koska UV-säteily vaurioittaa epoksimuovin molekyyliketjuja. Myös suurteho-LEDien synnyttämät suuret lämpötilat nopeuttavat epoksien hajoamista. LED-sirujen lämpölaajeneminen voi johtaa halkeamiin ja säröihin ko. materiaalissa. Tämän vuoksi on ollut tärkeää keksiä korvaavia materiaaleja epoksille. [Masui, Nakamura 2010]

Kaupallisissa sovelluksissa epoksi korvataan tavallisesti geeleillä, silikonilla, elastomeereillä ja kumimaisilla hartseilla. Silikonit ovat tavallisesti läpikuultavia, kestävät hyvin UV-säteilyä ja niitä voidaan käyttää hyvin korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi materiaaliryhmän tiheys on suhteellisen matala verrattuna kestopuoveihin ja ne ovat usein pehmeitä. Silikonien ongelmana on kuitenkin heikko adheesio rajapinnassa, joka voi aiheuttaa ilmakuplia rakenteeseen. Ilmiö voi johtaa valotehon laskuun primäärilinssin läpi. Huolimatta silikonien ongelmista niiden käyttö lisääntyy nopeaa

vauhtia materiaalikehityksen myötä. LED-sirujen kiinnitys (engl. die bonding) suosii silikonien käyttöä epoksien sijaan. [Masui, Nakamura 2010]

Primäärilinsseiltä vaadittavat ominaisuudet lisääntyvät kehityksen myötä. Näihin ominaisuuksiin kuuluvat mm. korkea taitekerroin ja lämmönjohtavuus. [Chujo, Saegusa 1992] Primäärilinsin viskositeetilla on myös suuri merkitys [Okuno 1998].

Lyijyvapaa pastajuottaminen (engl. reflow soldering) asettaa kapselointiaineelle omat vaatimukset. Juotoslämpötilan kasvaessa materiaalin tulee olla erittäin stabiili ja omata hyvät lämmönkesto-ominaisuudet. LED-tuotteiden vikaantumisaste käytännön sovelluksissa on erittäin suuri, sillä kaupallisissa sovelluksissa ei olla saavutettu 100 000 h toimintaikää. [Masui, Nakamura 2010]

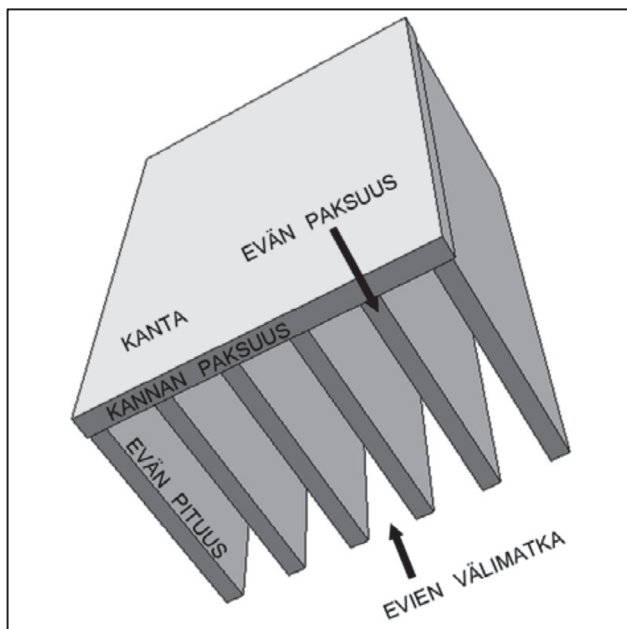
3.5 Jäähdytyslementit

Jäähdytyslementtien (engl. heat sink) käyttö tuli tarpeelliseksi LED-sovelluksissa, kun suuritehoiset diodit tulivat markkinoille. Jäähdytyslementin tarkoitus on johtaa lämpöä pois sitä tuottavasta komponentista. Valaisinsovelluksissa on yleisesti käytössä johdinkehystekniikka pintaliitoskomponenttien koteloinnissa (engl. SMD housing). [Steigerwald 2002] Tällä menetelmällä materiaalin lämmönkestävyys voidaan saada jopa 10 KW^{-1} arvoon, samalla pyrkien kontrolloidusti säilyttämään LED-liitoslämpötila alle 100 Celsius asteessa. Sovellusten valotehon ja siten myös syntyvän lämpöenergian kasvaessa tarvitaan tehokkaampia jäähdytyslementtejä. Näihin sovelluksiin elementit suunnitellaan suuriksi metallisiksi levyiksi, joiden lämmönkestävyys on alle 5 KW^{-1} . Haasteena on löytää tarpeeksi edullisia materiaaleja täyttämään nämä vaatimukset. [Zweben 2004]

Kuten kappaleessa 3.1 mainittiin, LEDin lämpötilan kasvu vaikuttaa monella eri tavalla negatiivisesti sen toimintaan. Yleisesti ottaen lämpötilan kasvun seurauksena fononien relaksaatioaika lyhenee ja siten fotonien luomiseen tarkoitettusta sähkötehosta fononien osuus kasvaa fotoneihin nähden. Toisin sanoen lämpötilan kasvu vähentää komponentin tuottamaa valovirtaa ja kasvattaa suhteessa sen emittoimaa lämpöenergiaa ympäristöön. Fononien aiheuttama lämpöhäviö lisää sirun lämpötilaa, jolloin sirun säteilyhyötysuhde laskee. Kohonnut lämpötila vaikeuttaa elektronien injektiota, vähentää varauksenkuljettajien tilatiheyksiä ja lyhentää sirun elinikää. Lisääntynyt lämpöenergia vaikuttaa puolijohteen ominaislämpöön ja lämmönjohtavuuteen kasvaneen fononiemission seurauksena. Puolijohteen materiaali virheiden esiintymistiheyden on todettu olevan riippuvainen myös sen lämpötilasta. [Jahkonen 2009]

Kuvassa 6 on esitetty esimerkkimalli jäähdytyslementistä. Jäähdytyslementin suunnittelussa tärkeimmät seikat ovat kannan pinta-ala ja paksuus, jäähdytysrivin (evä) paksuus, muoto ja pituus, rivojen välimatka, elementin materiaali sekä mahdollinen pintakäsittely. Näitä parametreja optimoimalla saavutetaan sovelluksen kannalta

edullisin lämmönsiirto ja komponenttien lämpötila. Suunnittelua vaikeuttaa väliaineen, virtausnopeuksien ja komponenttien sijainnin mukanaan tuomat muuttujat, jotka luonnollisesti vaikuttavat toisiinsa. [Jahkonen 2009]

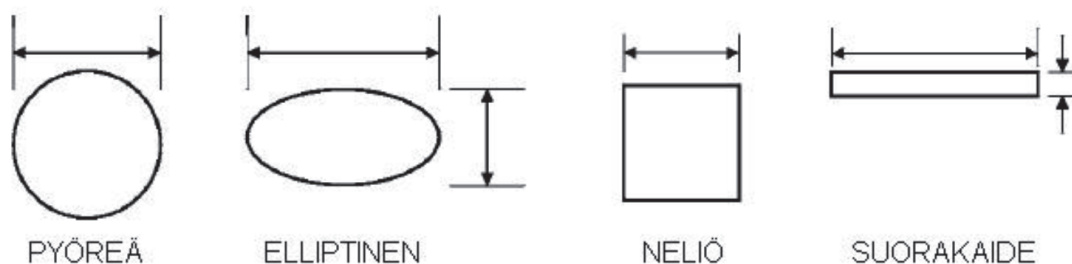


Kuva 6: Jäähdytyselementin suunnittelussa huomioitava geometria [Jahkonen 2009]

Yksinkertaisimmillaan jäähdytysrivan muoto on suora levy, joka on kiinnitetty kantaan koko sen pituudelta. Elementin toimintatehokkuutta pystytään arvioimaan rivan luomien virtaushäviöiden perusteella. Lämpövirtaus kulkee elementin vähäpaineisinta reittiä pitkin, siksi on tärkeää suunnitella rivarakenne kauttaaltaan mahdollisimman pienipaineiseksi. Lämpövirtausta voidaan tehostaa puhalluksella haluttuun suuntaan. [Chapman 1994]

Tavallisesti jäähdytyselementeissä käytetään sormimaisia rivoja, joiden poikkileikkaus voi olla pyöreä, elliptinen, neliö tai suorakaide (kuva 7). Yleensä sormimaiset rivat ovat tehokkaampia lämmönsiirtäjiä kuin levymäiset profiilit. Tämä johtuu sormimaisten rivojen pienemmästä virtausimpedanssista, josta seuraa lämmön korkeampi virtausnopeus. [Dong-Kwon 2008]

Mikäli verrataan sormimaista profiilia levyprofiiliin, jossa lämmönsiirtopinta-ala on identtinen, on sormimainen rakenne tehokkaampi. Tämä johtuu sormimaisen rakenteen kyvystä hajottaa lämpövirtauksen rajavirtauksia. Levyprofiili on parempi vaihtoehto sovellukseen, jossa jäähdytysprofiili asennetaan vertikaalisesti. Horisontaaliasennossa sormimainen rakenne on puolestaan suotuisampi. Pienten lämpövirtausten kohdalla sormimaisilla rivoilla ei saavuteta merkittäviä parannuksia levyprofiiliin verrattuna. [Sikka 2002]



Kuva 7: Jäähdytysrivojen poikkileikkauksia [muokattu Khan 2006]

Virtausominaisuudet ovat riippuvaisia profiilin poikkileikkauksesta. Elliptinen-muoto on teoriassa tehokkain, koska se tarjoaa suuren lämmönsiirtopinta-alan. Ohitusvirtausten suuruus on kuitenkin kyseisen geometrian ongelma. Pyöreiden rivojen ongelmana ovat suuret painehäviöt ja siksi niiden käyttö on vähäistä. [Jahkonen 2009]

Keraamit ovat materiaaliryhmänä keränneet laajalti huomiota jäähdytysselementtisovelluksissa. LED-sovelluksissa on käytetty esimerkiksi alumiininitridiä [Yang 2007], jonka lämmönjohtavuus saadaan jopa $200 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ materiaalin puhdistuksen myötä [Khor 2003]. Lämmönjohtavuutta parantaa myös elementin pinta-alan maksimointi. Alumiininitridin lämpölaajenemiskerroin on $4.5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [Accuratus 2002]. Alumiininitridin ominaisuudet ovat erittäin suotuisat jäähdytysselementtisovelluksiin, mutta yhdistettävä voidaan käyttää myös n-tyypin puolijohdemateriaalissa muodossa $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Kyseisestä puolijohdemateriaalista valmistettua kontaktipintaa voidaan soveltaa jopa 280 nanometrin LED-sovelluksiin.

Jäähdytysselementin suunnittelussa on suotuisaa ottaa huomioon elementtimateriaalin ja puolijohdemateriaalin lämpölaajenemiskertoimet, joiden tulisi olla mahdollisimman identtiset. Keraamien käyttöä jäähdytysselementeissä kuitenkin rajoittaa korkeat materiaalikustannukset. Puolijohdemateriaalien valotehon kehityksen kasvaessa jäähdytysselementeiltä odotetaan jatkuvaa parannusta lämpöominaisuuksien ja lämmön hajaannuttamisen osalta. [Masui, Nakamura 2010]

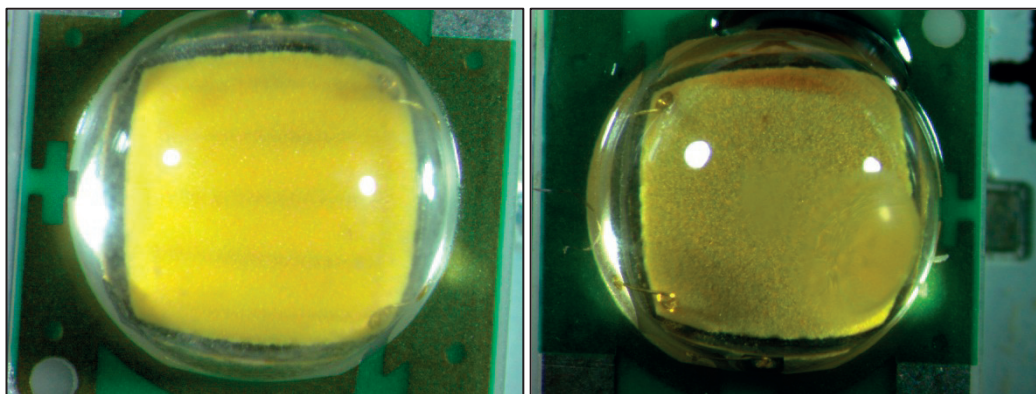
4 ONGELMAN MÄÄRITYS

Tässä luvussa esitellään asiakaslähtöinen ongelma LEDien vikaantumisesta hermeettisessä sovelluksessa. Sovelluksessa on läsnä LED-komponentti, sekundäärilinssi, piirikortti ja linssin kiinnitykseen soveltuva adhessiivi.

4.1 Ongelman määrittäminen ja kuvaus

Asiakaslähtöinen ongelma on nimensä mukaisesti asiakkaalta lähtöisin oleva tarve valmistaa ledin, piirikortin ja linssin muodostama rakenne IEC 60529-standardin IP67-luokituksen mukaiseksi pölyn ja kosteuden osalta. Asiakkaalle tulisi vastaavassa tilanteessa pystyä suositteluun materiaalia tai materiaaliyhdistelmää, jolla asiakas pystyy tiivistämään linssin ja piirikortin välisen rajapinnan IP67-luokituksen mukaiseksi. Materiaalin tulisi olla mahdollisimman edullinen, helppo soveltaa asiakkaan tuotantoprosessiin ja omata lopputuotteen vaatimat mekaaniset ominaisuudet. Tähän asti asiakkaat ovat ratkaisseet kyseisen ongelman esimerkiksi koteloimalla komponentit ulkoisesti vesi- ja pölytiiviksi. Kotelointi voi tosin osoittautua ongelmalliseksi mm. puhtaanapidon ja esteettisyyden osalta.

Aikaisemmin on pyritty luomaan tiivis rakenne sekundäärilinssin ja piirikortin välille useilla eri liimoilla, silikoneilla, pottausaineilla (engl. potting agents), teipeillä sekä edeltävien yhdistelmillä. Kokeellisten tutkimusten aikana on havaittu LEDien vikaantumista, himmenemistä, kellertymistä ja jopa sammumista tuntemattomasta syystä. Kuvasarjassa 8 on esitetty kemiallisen reaktion aiheuttama häiriö sovelluksessa. Yhdeksi vikaantumistekijäksi on arvioitu sopimattomat materiaalikombinaatiot.



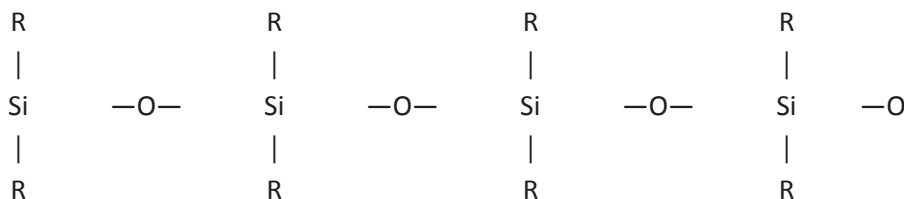
Kuvasarja 8: Kuvassa vasemmalla LED toimii sovelluksessa tarkoituksenmukaisesti ja siru on kirkas. Oikealla komponentti on tummunut oltuaan aktiivinen n. 1000 h.

4.2 Ongelman toimintamekanismi

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, LEDien vikaantumisen tarkka tekijä(t) ei ole tiedossa. On kuitenkin olemassa useita eri tekijöitä, joista vikaantuminen saattaa johtua. Yksi potentiaalinen tekijä on sekundäärilinssin kiinnitykseen tai kapselointiin käytettävän adhessiivin VOC-päästöt (engl. Volatile Organic Compound) rakenteen sisällä, jotka aiheuttavat kemiallisen reaktion puolijohdemateriaalin ja/tai silikonikapselointiaineen eli primäärilinssin kanssa vaikuttaen näin negatiivisesti sen toimintaan. LED-komponentin sirun, primäärilinssin ja loisteaineen roolia vikaantumisessa tutkitaan luvuissa 7 ja 8.

Toinen mahdollinen tekijä on juotostinassa olevat juotosapuaineet eli fluksit, joita todennäköisesti on läsnä LEDin juotoksessa. Liian korkea lämpötila sekundäärilinssin sisällä voi johtaa valovirran laskemiseen. Ilmiön mekanismi perustuu linssin pinnan sulamiseen tai vaurioitumiseen lämpötilan ylittäessä polymeerilinssin lasisiirtymälämpötilan, mikä johtaa edelleen sekundäärilinssin optisten ominaisuuksien heikkenemiseen. Liian korkea lämpötila voi myös vahingoittaa LED-komponentin puolijohdemateriaalia. Luvussa 7 käsitellään lämpötilanhallintaa, jotta edeltävältä ilmiöltä välttyttäisiin.

Akryyliä ja epoksia sijaan valmistajat käyttävät suurteho-LEDeissä primäärilinssin kapselointiaineina silikonipohjaisia materiaaleja, esimerkiksi hiilivety-polyorganosiloksaaneja (kuva 9). Polyorganosiloksaanit ovat optisesti hyvin kirkkaita, huokoisia ja herkkiä kaasujen diffuusiolle. Polyorganosiloksaanit kestävät jopa yli 200 celsiuksen lämpötilan ennen kuin materiaali alkaa kemiallisesti hajota. [Cree Inc. 2011]



Kuva 9: Hiilivety-polyorganosiloksaanin rakennekaava, R = hiilivetyryhmä [Cree Inc. 2011]

Ulkopuoliset yhdisteet voivat helposti tunkeutua kapselointiaineeseen ja läpäistä sen. Vikaantumisereaktio sirun pinnalla voi tapahtua jopa muutaman käyttötunnin jälkeen tai vasta 1 000 tunnin kuluttua. Tämän takia näytteiden testaus syklin on oltava riittävän pitkä.

Mikäli vikaantumismekanismi liittyy VOC-yhdisteisiin, on niiden tunnistuksessa ja määrittämisessä paljon väärinkäsityksiä. Väärinkäsitykset ilmenevät siitä, miten materiaalivalmistajat raportoivat VOC-pitoisuuksista materiaalikohtaisissa MSDS-dokumenteissaan (Material Safety Datasheet). Näiden dokumenttien tulkitsemiseen on suhtauduttava kriittisesti.

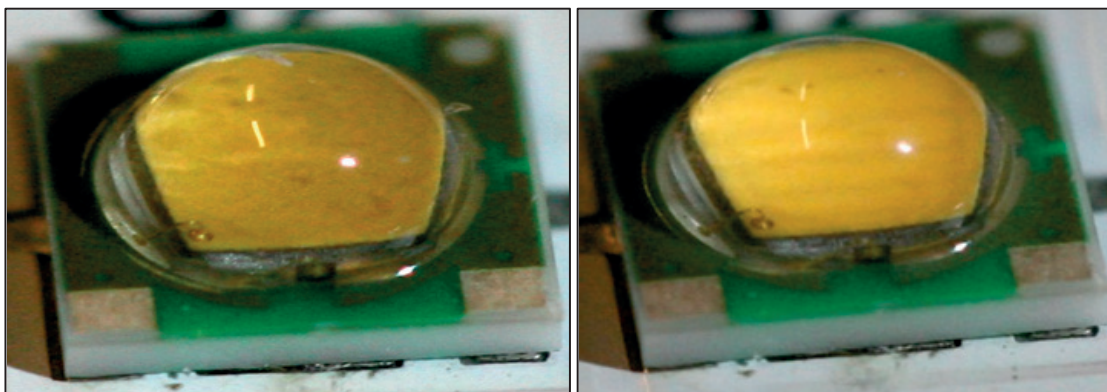
EPA (United States Environmental Protection Agency) luokittelee VOC-yhdisteiksi kaikki hiiltä sisältävät yhdisteet poislukien hiilimono- ja dioksidi, hiilihappo, metallikarbidit ja –karbonaatit, jotka hajoavat atmosfääriin fotokemiallisessa reaktiossa. Alan kirjallisuus määrittelee VOC-yhdisteet orgaanisiksi yhdisteiksi, jotka voivat haihtua ilmakehään huoneilman lämpötilassa ja paineessa. EU:n tulkinta poikkeaa hieman edeltävistä liittyen yhdisteen kiehumispisteeseen. Mikäli orgaanisen yhdisteen kiehumispiste on 101.3 kPa paineessa 250°C tai alle, täyttää kyseinen yhdiste VOC-määritelmän. Esimerkiksi eräs syanoakrylaattivalmistaja ilmoittaa tuotteensa VOC-pitoisuuden alittavan kolme painoprosenttia. Tuote sisältää 80-100 painoprosenttia syanoakrylaattia, joka sisältää hiiltä. Lisäksi valmistaja ilmoittaa tuotteen kiehumispisteen alittavan reilusti 250°C. Edeltävästä johtuen valmistajan ilmoittama kolmen painoprosentin VOC-pitoisuus on aiheellista kyseenalaistaa. [EPA 2012]

WHO (World Health Organization) luokittelee VOC-yhdisteet kiehumispisteen mukaan kolmeen ryhmään; SVOC (Semi Volatile Organic compound), VOC (Volatile Organic Compound) ja VVOC (Very Volatile Organic Compound). [EPA 2012]

Testauksessa on syytä kiinnittää huomiota seuraaviin seikkoihin VOC-yhdisteisiin liittyen. VOC-yhdisteiden osuus tutkittavan materiaalin koostumuksesta on kriittinen. Materiaalien välillä on suuria VOC-pitoisuuseroja aina 0:sta lähes 100:aan painoprosenttiin. Materiaalin kiehumispiste määrittää missä lämpötilassa höyrystyminen alkaa. Kiehumispisteeseen vaikuttaa materiaalin höyrinpaine; mitä korkeampi on paineen arvo, sitä korkeampi kiehumispiste. Myös VOC-yhdisteiden laatu on huomioitava; voiko VOC-yhdiste höyrystyessään diffusoitua primäärilinssiin tai sen

läpi. Tutkimuksen kannalta on tärkeää myös tutkia onko vikaantumisreaktio tällöin peruuttamaton.

Alustavassa tutkimuksessa on havaittu ettei LED-komponentin vikaantuminen ole aina peruuttamaton ilmiö. Sekundäärilinssin poiston jälkeen komponentti voi ”toipua” – valovirran arvo voi palautua lähes alkuperäiseen arvoonsa. Edeltävä ilmiö on esitetty kuvasarjassa 10. Toipumistesteistä on laajemmin luvussa 7. Toipumisaste on näytteiden kohdalla hyvin yksilöllinen.



Kuvasarja 10: Komponentin ”toipuminen”. Kuvassa vasemmalla vikaantunut komponentti, oikealla sama komponentti 72h sekundäärilinssin poiston jälkeen komponentin pysyttyä aktiivisena. Toipumisen aikana valovirta kasvoi 84 lumenia.

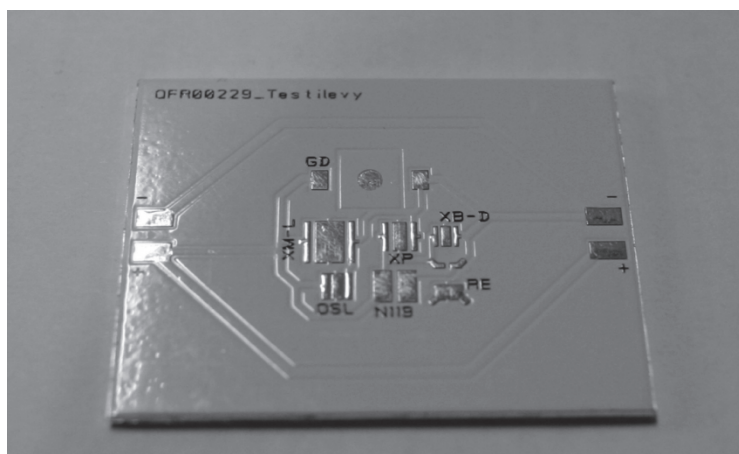
Toinen vikaantumisteoria perustuu silikonin ja lasin MTTF-vertailuun (engl. Mean Time To Failure) kapselointiaineena. Vertailussa tutkitaan lasin ja silikonin valovirran, kromaattisuuden ja korreloivan värilämpötilan (CCT) säilymistä kiihtyvässä lämpörasituksessa. Silikonin kohdalla lämpöhajoaminen on huomattava tekijä vertailussa. Puolijohdemateriaalin emittoima lämpövirta voi irroittaa metyylikomponentin (R) $[R_2SiO]_n$ -rakenteesta. Sidoksen hajoaminen voi johtaa silikonin kellertymiseen, optisten ominaisuuksien heikkenemiseen sekä valovirran ja kromaattisuuden laskuun. Lasin kohdalla vastaavaa ominaisuuksien heikentymistä ei havaittu lämpörasituksen aikana. [Wang, Tsai, Liou, Cheng, Huang, Chang 2012]

5 TESTAUSMENETELMÄ

Tässä luvussa esitellään tarkemmin testausmenetelmä, mittaukset ja ympäristö, jossa testaukset suoritetaan.

5.1 Alkuasetelma

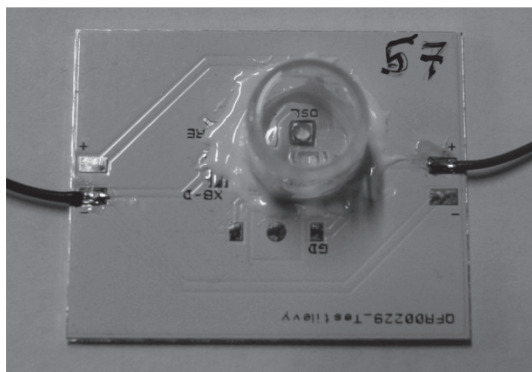
Testausprosessi alkaa testattavan materiaalin valinnasta. Materiaali voi olla teippi, liima tai pottausaine (engl. potting agent). Testaukseen suunniteltua piirikorttia käytetään kaikissa näytteissä, jotta näytteiden alkuasetelma olisi mahdollisimman identtinen (kuva 11). Tutkittavia LED-komponentteja pyritään vaihtelevaan valmistaja- ja tyyppikohtaisesti tarpeellisen otosavaruuden saavuttamiseksi testituloksissa.



Kuva 11: Materiaalitestaukseen suunniteltu piirikortti; piirikortilla on juotospadit usealle eri LED-komponentille.

Ennen testausprosessin alkua LED-komponentti juotetaan piirikortin pinnalle. LEDit ja virtajohdot juotetaan yhteistyökumppanin toimesta, jotta näytteet vastaisivat mahdollisimman tarkasti toisiaan. Materiaalinäyte asetetaan lähelle LED-komponenttia siten, että näyte jää asennettavan sekundäärilinssin alle eikä se ole kosketuksissa komponentin primäärilinssin kanssa. Sekundäärilinssi kiinnitetään piirikorttiin mahdollisimman ilmatiiviisti samalla materiaalilla mitä materiaalinäyte on. Tiivistysmateriaalin määrä ylimitoitetaan jokaisessa näytteessä, jotta linssin ja piirikortin rajapinta tulisi mahdollisimman tiiviiksi. Kuvassa 12 on esitetty eräs testinäyte. Näyttemateriaalin annetaan kovettua valmistajan ilmoittaman ajan.

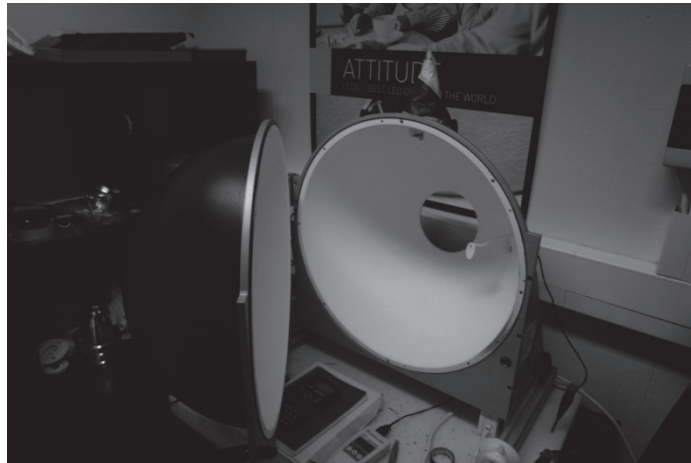
Näytteisiin ei kiinnitetä ulkoista jäähdytyslementtiä, koska näytteitä halutaan ajaa korotetussa lämpötilassa vikaantumistodennäköisyyden maksimoimiseksi. Lämpötila tulee kuitenkin hallita siten, että lämpöenergia ei vahingoita puolijohdemateriaalia tai sekundäärilinssiä. LED-valmistajat ilmoittavat maksimilämpötilan, jonka heidän tuotteensa kestävätkin. Testien aikana metallinen piirikortti toimii alkeellisena jäähdytyslementtinä.



Kuva 12: Esimerkinäyte.

5.2 Testaus

Testaus aloitetaan määrittämällä valovirran lähtöarvo kullekin näytteelle. Valovirran määrittäminen tapahtuu integroivalla pallolla Gigahertz UMBB-500 (kuva 13), jossa sähkövirran arvoksi on asetettu 350mA. Useimmat LED-valmistajat ilmoittavat komponenttiansa maksimi lm/W -hyötysuhteen syntyvän kyseisellä virran arvolla.

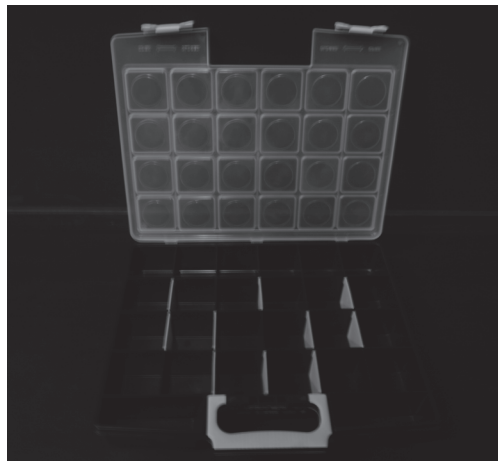


Kuva 13: Valovirtamittauksissa käytetty Integroiva pallo Gigahertz UMBB-500

Kaavalla 1 kullekin näytteelle on määritetty valovirran arvo ennen ja jälkeen testauksen.

$$\frac{\text{Kalibrointi-LED}_{\text{valmistaja}} [\text{lm}]}{\text{Kalibrointi-LED}_{\text{pallo}} [\text{lm}]} * \text{Näyte}_{1\text{min}} [\text{lm}] \quad (1)$$

Osoittajan arvo on valmistajan ilmoittama kalibrointi-LEDin valovirta, nimittäjän arvo ilmoittaa pallolla mitatun kalibrointiledin valovirran ja suure $\text{Näyte}_{1\text{min}}$ on pallolla mitatun näytteen valovirta oltuaan aktiivinen minuutin. Valovirtamittausten jälkeen näytteet asetetaan testauslokerikkoon (kuva 14). Sijoitus tapahtuu limittäin, jotta komponenttien lämpötilat vaikuttaisivat mahdollisimman vähän toisiinsa. Näytteet kytketään 700mA:n vakiovirtalähteeseen 1 000:ksi tunniksi



Kuva 14: Testauslokerikko.

5.3 Testauksen päätös

Testauksen päätyttyä näytteet poistetaan lokerikosta ja niiden valovirrat mitataan toistamiseen. Valovirtojen erotukset testauksen alussa ja lopussa kirjataan ylös. Pyrkimyksenä on määrittää mahdollisimman monta näytettä, joiden valovirta ei ole laskenut alkuperäisestä mittauksesta. Valovirtamittausten virhemarginaali on $\pm 10\%$. Toimivien ja vikaantuneiden näytteiden syy-seuraus -suhteita analysoidaan ja eräille näytteille suoritetaan ns. toipumistesti, joista on lisää luvussa 7.

5.4 Upotustesti

Upotustesti suoritetaan näyttemateriaaleille osana jatkotutkimusta IEC 60529-standardin IP67-luokituksen todentamiseksi. Näyte sijoitetaan metrin syvyiseen veteen noin 30 minuutiksi. Upotusnäytteet eivät ole samoja kuin vikaantumistestauksen läpikäyneet, koska näytteeseen tulee kiinnittää indikaattoritarra sekundäärilinssin alle, joka ilmaisee värinmuutoksella veden läsnäolon rakenteessa. Upotustestin tarkoituksena on selvittää onko vesitiiviin rakenteen luominen mahdollista näyttemateriaaleilla, joilla on tutkittu LED-komponentin vikaantumista.

6 VIKAANTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä luvussa on tarkoituksena kartoittaa kaikki mahdolliset testaukseen vaikuttavat muuttujat kohtuullisuuden rajoissa. Muuttujat voidaan jakaa hallittuihin ja hallitsemattomiin sekä testauksen kannalta oleellisiin ja vähemmän olennaisiin. Liitteessä on esitetty syy-seuraus –diagrammi tämän luvun muuttujista.

6.1 Materiaalit

Materiaalimuuttujat ovat todennäköisesti merkittävimmät muuttujat testitulosten kannalta (taulukko 1). Testauksessa käytetyt LEDit A, B ja C poikkeavat erittäin paljon toisistaan niin termisiltä-, sähköisiltä- kuin optisilta ominaisuuksiltaan. Näiden komponenttien vikaantumisherkkyyksissä on myös runsaasti eroja. Esimerkiksi kaksi eri LEDiä voivat antaa toisistaan huomattavasti poikkeavan testituloksen muuten identtisessä testissä. Primäärilinssin kapselointiaine on valmistajakohtainen samoin kuin puolijohdemateriaali.

Taulukko 1: Materiaalimuuttujat

Muuttuja	Taso						
LED	Primäärilinssi	Sirun materiaali	Valmistaja				
Piirikortti	Materiaali	Pad-materiaali	Juotosmaski				
Juotomateriaali	Koostumus	Likaantuminen	Fluksi	VOC			
Teippi	Ominaisuus	Runkomateriaali	Adheesiopinnoite	Lämpölaajenemiskerroin	UL	UV	VOC
Liima	Materiaali	Ominaisuus	Lämpölaajenemiskerroin	UL	UV	VOC	
Pottausaine	Materiaali	Ominaisuus	Lämpölaajenemiskerroin	UL	UV	VOC	
Linssi	Materiaali	Geometria					

Identtinen piirikortti näytteissä vähentää muuttujien määrää ja tarjoaa samalla alkeellisen jäähdytys-elementin kaikille näytteille. Juotomateriaalina käytetään juotospastaa yhteistyökumppanin toimesta. Tutkittavat materiaalit ovat luonnollisesti tärkeimmät muuttujat ja määrittävät pitkälti näytteiden menestyksen testauksessa. Näiden materiaalien koostumus sekä VOC-yhdisteiden mahdollinen läsnäolo määrittävät materiaalin lopullisen sovelluskelpoisuuden.

Linssimateriaalit PMMA, PC ja lasi vaikuttavat mahdollisesti myös testituloksiin. Materiaaleilla on toisistaan poikkeavat lämmönkesto-ominaisuudet, kosteuden absorptio, kemiallinen inerttiys sekä kyky diffusoida kaasuja. Lisäksi linssit muodostavat toisistaan poikkeavat hermeettiset ilmatilavuudet näytteissä, koska linssien geometriat ovat erilaiset.

6.2 Menetelmä

Menetelmämuuttujien rooli on tutkimuksen kannalta tärkeä, koska muuttujat vaikuttavat todennäköisesti usealla eri tapaa tuloksiin (Taulukko 2). Luvussa 7 on tarkoituksena määrittää kullekin LED-tyypille suotuisa lämpötila, jotta lämpöenergia ei vahingoita itse komponenttia tai linssiä. Lämpötilan tulee kuitenkin olla riittävän korkea mahdollisen vikaantumisreaktion aktivoitumiselle. Testauksessa määritetään näytteen sisältävän lokeron ja sekundäärilinssin sisällä vallitseva lämpötila. Linssin sisällä olevan lämpötilan avulla on mahdollista määrittää LED-komponentin lämpötila valmistajan ilmoittamien tietojen avulla.

Taulukko 2: Menetelmämuuttujat

Muuttuja	Taso		
	Mittauspiste		
LEDin testilämpötila	Mittauspiste		
Testivirta	Virran suuruus		
Ilmatiiviys	Todentaminen		
Juotos	Menetelmä	Materiaalin määrä	
Testiaika	Suunnittelu		
Testattavan materiaalin asennus	Sijainti	Materiaalin määrä	Kovetus*
Piirikortin puhtaus	Puhdistusaine	Kuivaus	
*Lämpötila, ilmankosteus, UV, 2-komponentti			

Testivirtana käytetään 700 mA:a, joka on katsottu riittävän suureksi virraksi verrattaessa asiakkaiden sovelluksissaan käyttämiin virran arvoihin. Virran arvo on mitoitettu siten, että vikaantumisen todennäköisyys kasvaisi kohonneen lämpö- ja fotonien energian seurauksena. Näyterakenteen ilmatiiviys on mahdollista selvittää esimerkiksi upotuskokeella, jossa näyte sijoitetaan metrin syvyiseen vesiastiaan puoleksi tunniksi. Näyterakenteen hermeettisyyden luonti on tutkimuksen suurin haaste. Juotosprosessissa juotospastan mahdollisten VOC-yhdisteiden on tarkoitus poistua suurimmilta osin materiaalista lämpökäsittelyn seurauksena. Testiaika, 1 000h, on yleisesti sovellettu ja sopivaksi määritelty ajanjakso, jonka aikana vikaantuminen todennäköisesti tapahtuu.

Materiaalinäyte sijoitetaan LED-komponentin juureen sekundäärilinssin alle. Materiaalinäytteen ainemäärä mitoitetaan runsaaksi vikaantumisen edesauttamiseksi. Adhessiivin kovetuksessa ei käytetä korotettua lämpötilaa eikä ilmankosteuteen tai UV-säteilyn määrään voida juurikaan vaikuttaa. Piirikortin puhdistukseen ei käytetä kemikaaleja ennen näytteen valmistusta, koska tavoitteena on minimoida käytettyjen kemikaalien määrä ja niiden vuorovaikutukset toistensa kanssa.

6.3 Ympäristö

Ympäristömuuttujiin (Taulukko 3) ei pystytä vaikuttamaan rajallisten resurssien takia. Testaustilan ilmankosteus, paine ja lämpötila ovat pitkälti tavallisen lämmitetyn huoneilmaston määäämiä suureita eikä niiden tarkkoja arvoja ole tässä yhteydessä tarkoituksenmukaista määrittää. Sama pätee ilmansaasteisiin, joiden läsnäoloa on edeltävän kaltaisessa tilassa mahdotonta hallita. Vaikka testausympäristössä esiintyisi pieniä muuttujia, on jokaiseen näytteeseen kohdistuvat vaikutukset silti identtiset.

Taulukko 3: Ympäristömuuttujat

Muuttuja	Taso	
Ilmankosteus	Ilmastointi	
Lämpötila	Mittauspiste	
Ilmansaasteet	Laatu	Määrä
UV	Intensiteetti	
Testiolosuhteet	Lokerikko	

UV-säteily on ikkunattomassa huoneessa luonnollisesti hyvin vähäistä. Merkittävin ympäristömuuttuja on lokerikko, jossa näytteet säilytetään testauksen ajan. Lokerikon käytössä tärkeintä on lämpötilan hallinta, joka osoitetaan luvussa 7. Osa näytteistä suljetaan kannen alle ja loput sijoitetaan avonaiseen lokerikkoon. Esimerkiksi LED B:n lämpötila kasvaa liian korkeaksi suljetussa lokerikossa ja vaatii siksi avonaisen testiympäristön. LED A sijoitetaan suljettuun lokerikkoon, koska komponentti ei kehitä haluttua määrää lämpöenergiaa avonaisessa tilassa.

Näytteet sijoitetaan limittäin lokerikkoon niin, että viereisessä lokerossa ei ole näytettä. Näin ehkäistään näytteiden lämpövaikutukset toisiinsa. Testitulokset ja havainnot ovat osoittaneet, että tämä käytäntö on sopiva tutkimukselle.

6.4 Yksilö

Yksilömuuttujista (Taulukko 4) merkittäviä ovat linssin tiivistys ja valovirran mittaus. Mikäli linssin ja piirikortin välinen rajapinta ei ole tiivis, on näytteen testauksen lopussa antama tulos merkityksetön. Valovirran mittaus vaatii yksilöltä tarkkaavaisuutta ja Integroivan pallon käyttökokemusta. Jos näytteitä ei mitata samalla virran arvolla ennen ja jälkeen testauksen, eivät tulokset ole vertailukelpoisia. Mittaustulosten pyöristäminen ja oikeellisuus ovat mittaajan vastuulla.

Taulukko 4: Yksilölliset muuttujat

Muuttuja	Taso	
LED-juotos	Huolellisuus	
Linssin tiivistys	Huolellisuus	
Kovettumisaika	Todentaminen	
Valovirran mitta	Huolellisuus	
Mittatarkkuus	Mittalaitteet	Pyörästys

LED-juotos suoritetaan automatisoidusti yhteistyökumppanin toimesta. Mikäli juotospasta sisältää juotosapuainetta, fluksia, oletetaan sen kaasuuntuvan pois korotetussa lämpötilassa. Jos näin ei tapahdu, on näytteiden lähtötilanne silti identtinen. Ideaalitulanteessa juotospasta sisältäisi fluksia, jossa ei ole alhaisessa lämpötilassa kaasuuntuvia orgaanisia yhdisteitä. Materiaalinäytteen kovettumisaika mitoitetaan siten, että materiaali on kovettunut ja näytettä on mahdollista käsitellä turvallisesti mitattaessa valovirran lähtöarvoa.

6.5 Välineet

Välinemuuttujat (Taulukko 5) eivät ole tärkeässä roolissa testitulosten kannalta, sillä ne säilyvät muuttumattomana tutkimuksen ajan. Välineistö on kalibroitu tutkimuksen aikana.

Taulukko 5: Välinemuuttujat

Muuttuja	Taso
Integroiva pallo	Kalibrointi
Vakiovirtalähde (testaus)	Kalibrointi
Digitaalinen lämpömittari	Kalibrointi

Käytetyt vakiovirtalähteet ovat kaikki arvoltaan 700 mA ja Integroivan pallon virtalähde pysyy samana koko tutkimuksen ajan. Digitaalisella lämpömittarilla on määritetty testauslokerikon ja näytteiden sekundärilinssien alla olevat lämpötilat. Lämpötiloihin vaikuttaa usea eri muuttuja, joten mittatarkkuutta on hyvin vaikea määrittää.

7 DESIGN OF EXPERIMENTS 1

Design of Experiments –muuttuja-analyysi (lyhyesti DoE) on hyödyllinen työkalu tilanteessa, jossa tutkitaan kahden tai useamman muuttujan vaikutusta suunnittelun tai prosessin ulostuloon. Analyysin tarkoitus on selvittää prosessin kaikkien merkittävien muuttujien ja niiden tasojen kombinaatiot. Esimerkkiprosessi sisältää muuttujat A ja B. Tällöin A-muuttujaan sisältyy variaatiotasot a, samoin kuin muuttujaan B variaatiotasot b. Tällöin näytesarjan tulee sisältää tasojen-ab kaikki mahdolliset kombinaatiot. [Montgomery 2009]

Prosessin ulostuloa muuttavaa muuttujan vaikutusta kutsutaan päävaikutukseksi. DoE-analyysi on erittäin tehokas määrittämään näiden päävaikutusten yhteisvaikutuksia prosessissa. Koska analyysimenetelmä sisältää itsessään tietyn virhemarginaalin, on analyysi sitä luotettavampi, mitä useampi näyte edustaa kutakin muuttujakombinaatiota. [Montgomery 2009] Usein DoE-työkalun mielekäs soveltaminen ja käytössä olevat resurssit määrittävät DoE-sarjan näytekoot.

Tässä työssä DoE-työkalulla pyritään johdonmukaistamaan materiaalitutkimus ja hallitsemaan muuttujien vaikutusta testinäytteissä. DoE:n avulla pystytään paikantamaan syy-seuraus –suhteita ja määrittämään muuttujien yhteisvaikutuksia.

7.1 Suunnittelu

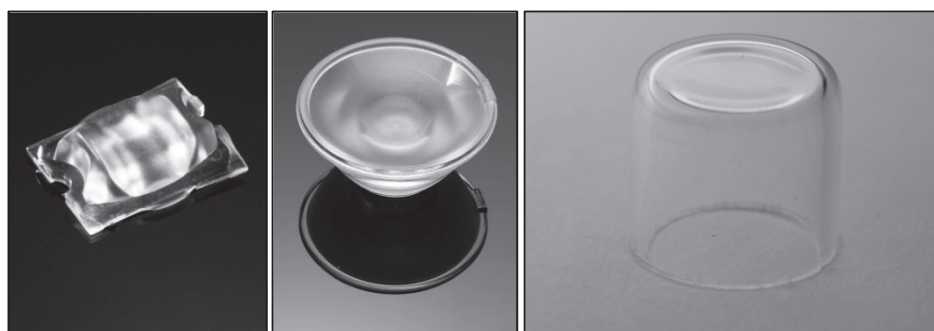
Design of Experiments 1 –sarjan suunnittelu alkaa näytesarjan suunnittelusta. Suunnittelun kannalta tärkein parametri on valita kriittiset ja testituloksiin eniten vaikuttavat muuttujat. Muuttujien määrittämisen jälkeen määritetään kaikki tasot, joiden välillä muuttujien arvot voivat vaihdella. Tässä tapauksessa arvot eivät ole numeerisia lukuja vaan materiaaleja ja komponentteja. DoE 1 -sarjalle määritetään 4 muuttujaa, jotka ovat materiaalinäyte, linssi, LED-komponentti ja fluksi. Muuttujat ovat esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6: Design of Experiments 1 –sarjan muuttujat

Materiaalinäyte	Linssi	LED	Fluksi
X	Lasi	A	(y)es
Y	PMMA	B	(n)o
Z	PC	C	
W			

Materiaalinäytteitä valitaan 4 kappaletta (X, Y, Z ja W), joiden valinta perustuu materiaalitutkimuksen alustaviin havaintoihin. Materiaaleista X ja Y edustaa menestyneitä testinäytteitä, Z ja W ovat vikaannuttaneet LED-komponentin alustavassa materiaalitutkimuksessa. Tutkimuksen kannalta on erittäin tärkeää valita testauksen kohteeksi myös materiaaleja, jotka todennäköisesti aiheuttavat vikaantumisen, jotta vikaantumismekanismi voidaan paikantaa ja määrittää.

DoE 1 -sarjassa käytetään kolmea eri linssimateriaalia; lasia, PMMA:ta ja PC:tä. Koska lasi on hyvin inertti ja lämmönkestävä materiaali, on sen rooli toimia referenssimateriaalina PMMA:lle ja PC:lle. DoE 1 -sarjan linssit ovat esitetty kuvasarjassa 15.



Kuvasarja 15: DoE 1 -sarjassa käytetyt sekundäärilinssit; vasemmalta PMMA, PC ja lasi [LEDiL Oy 2012]

DoE 1 -sarjaan on valittu kolme eri LEDiä; A, B ja C. Nämä komponentit ovat kaupallisesti yleisiä ja siksi niiden ominaisuudet ovat ennestään tuttuja. LED A poikkeaa kolmesta mainitusta eniten lämpöominaisuudeltaan lämpöresistanssin ollessa alle puolet LED B:n ja LED C:n arvoista. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että LED A synnyttää huomattavasti vähemmän lämpöenergiaa testauksen aikana kuin LED B ja C.

Fluksi eli juotosapuaine on yksi DoE 1 -sarjan muuttujista, koska pyrkimyksenä on selvittää fluksin rooli vikaantumisessa. Puolet sarjan näytteistä sisältävät fluksia. Käytetty fluksi sisältää alkoholia, glykolia ja hydrokloridia, jotka ovat EPA:n ja EU:n määritelmien mukaan VOC-yhdisteitä [EPA 2012]. Fluksin kiehumispiste on valmistajan mukaan 82°C. Fluksinäyte asetetaan LED-komponentin välittömään läheisyyteen sekundäärilinssin alle materiaalinäytteen viereen.

Lämpötila on DoE 1 -sarjassa erittäin tärkeä vakioitava suure. Taulukossa 7 tutkitaan testauslokerikon kannen sulkemisen vaikutusta lokeron ja lasilinssin alla vallitsevaan lämpötilaan. Lokerikon kannen sulkeminen nostaa sekundäärilinssin sisälämpötilan keskimäärin 11°C astetta suuremmaksi. Digitaalisen lämpömittauksen perusteella sekundäärilinssimateriaali ei käytännössä vaikuta LED-komponentin lämpötilaan. Taulukosta 7 havaitaan, että LED B:n ja C:n osalta kannen sulkeminen kasvattaa mainittujen komponenttien lämpötilat liian korkeaksi. Edeltävän takia näitä komponentteja sisältävät näytteet asetetaan avonaiseen lokerikkoon testauksen ajaksi.

Taulukko 7: Kannettoman ja kannellisen lokeron sekä sekundäärilinssin alta mitatut lämpöarvot. Linssimateriaalin vaikutus lämpötilaan $\pm 2^\circ\text{C}$.

LED	Kansi auki		Kansi kiinni		Kansi auki	Kansi kiinni
	Lokero [$^\circ\text{C}$]	Sekundäärilinssi [$^\circ\text{C}$]	Lokero [$^\circ\text{C}$]	Sekundäärilinssi [$^\circ\text{C}$]	Komponentin lämp. [$^\circ\text{C}$]	Komponentin lämp. [$^\circ\text{C}$]
A	59,6	65,2	71,6	74,3	73,7	82,8
B	58,8	82,6	74,6	98,2	105,3	120,9
C	56,2	76,3	68,6	84,4	99	107,1

Liian alhainen lämpötila saattaa estää vikaantumismekanismien aktivoitumisen ja puolestaan liian korkea lämpötila voi ylittää ataktisen PMMA-linssin lasisiirtymälämpötilan (erään linssimateriaalin T_g on 117°C) johtaen PMMA:n kiinteän lasimaisen olomuodon katoamiseen linssin rakenteesta. PC- ja lasilinssin kohdalla vastaavaa ongelmaa ei ole, koska niiden T_g -arvot ovat korkeammat (erään PC-linssimateriaalin T_g on 144°C).

Taulukossa 8 on esitetty LED-komponenttien lämpötilan-, jännitteen-, virran- ja sekundäärilinssin sisälämpötilan arvot testauksessa. Lisäksi taulukossa ilmoitetaan komponenttien lämpöresistanssin, lämpötilan ja virran arvot maksimi hyötysuhteen saavuttamiseksi. Komponenttien lämpötilat ovat määritetty kaavalla 2.

Taulukko 8: Design of Experiments 1 -sarjassa käytettyjen LEDien lämpöarvot. Jännite ja lämpöresistanssi ovat valmistajien ilmoittamia suureita.

LED	Jännite [V]	Virta [mA]	Lämpöresistanssi [$^\circ\text{C}/\text{W}$]	Sekundäärilinssi [$^\circ\text{C}$]	Komponentin lämp. [$^\circ\text{C}$]	Komponentin max. lämp. [$^\circ\text{C}$]	Hyötysuhde max. [mA]	Hyötysuhde max. [$^\circ\text{C}$]
A	3,05	700	4	74,3	82,8	150	350	25
B	3,45	700	9,4	82,6	105,3	125	350	25
C	3,25	700	10	76,3	99	135	350	25

$$T_{\text{Komponentti}} = T_{\text{Ympäristö}} + (U_{\text{Komponentti}} * I_{\text{Komponentti}} * R_{\text{Komponentti}}) \quad (2)$$

Kaavassa $T_{\text{Ympäristö}}$ on digitaalisen lämpömittarin ilmoittama suure, kun anturi on asetettu kiinni LED-komponenttiin lasikuvun alle. Suure $I_{\text{Komponentti}}$ on testivirta ja $U_{\text{Komponentti}}$ (jännite) sekä $R_{\text{Komponentti}}$ (lämpöresistanssi) ovat komponenttivalmistajan ilmoittamia suureita. Taulukon 8 tiedoista havaitaan, että kaikilla kolmella LED-komponentilla saavutetaan maksimi hyötysuhde 350 mA:n virran arvolla ja 25°C :sen lämpötilassa.

DoE 1 -sarja sisältää neljä (4) alasarjaa; jokaista alasarjaa edustaa yksi materiaalinäyte. Toisin sanoen jokaisessa saman alasarjan näytteessä on sama materiaalinäyte. Taulukossa 9 on esitetty yksi DoE 1 -sarjan alasarjoista näytemateriaalille X. Materiaaleille Y, Z ja W määritetään identtiset alasarjat.

Taulukko 9: DoE 1 -sarjan alasarja materiaalinäytteelle X.

Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi
1:1A	X	Lasi	A	y
1:1B	X	Lasi	A	y
1:2A	X	Lasi	A	n
1:2B	X	Lasi	A	n
1:3A	X	Lasi	B	y
1:3B	X	Lasi	B	y
1:4A	X	Lasi	B	n
1:4B	X	Lasi	B	n
1:5A	X	Lasi	C	y
1:5B	X	Lasi	C	y
1:6A	X	Lasi	C	n
1:6B	X	Lasi	C	n
1:7A	X	PMMA	A	y
1:7B	X	PMMA	A	y
1:8A	X	PMMA	A	n
1:8B	X	PMMA	A	n
1:9A	X	PMMA	B	y
1:9B	X	PMMA	B	y
1:10A	X	PMMA	B	n
1:10B	X	PMMA	B	n
1:11A	X	PMMA	C	y
1:11B	X	PMMA	C	y
1:12A	X	PMMA	C	n
1:12B	X	PMMA	C	n
1:13A	X	PC	A	y
1:13B	X	PC	A	y
1:14A	X	PC	A	n
1:14B	X	PC	A	n
1:15A	X	PC	B	y
1:15B	X	PC	B	y
1:16A	X	PC	B	n
1:16B	X	PC	B	n
1:17A	X	PC	C	y
1:17B	X	PC	C	y
1:18A	X	PC	C	n
1:18B	X	PC	C	n

Alasarjan näytteissä ovat edustettuna kaikki 18 muuttujien kombinaatiota. Näytteiden merkinnässä, esimerkiksi 1:1A, ensimmäinen numero on alasarjan tunnistetieto ja toinen numero näytteen tunniste. Saman numerosarjan sisältävät näytteet ovat keskenään identtisiä. Toisin sanoen näytepari 1:1A ja 1:1B sisältävät samat muuttujat.

Yhden alasarjan näytelukumäärä on näin ollen 36. Koska DoE 1 -sarja sisältää tilastollisen virheen, on jokaisesta muuttujakombinaatiosta kaksi näytettä. Tällä tavalla tilastollista häiriötekijää voidaan pienentää. DoE-analyysi on sitä luotettavampi, mitä suurempi on identtisten näytteiden lukumäärä. Käytännön syistä lukumäärä on rajattu kahteen.

7.2 Design of Experiments 1 –täydennyssarja

Alustavassa Design of Experiments 1 –sarjan suunnittelussa havaittiin, että materiaali R ei valmistajan mukaan sisällä laisinkaan VOC-yhdisteitä. Tämä on harvinaista, sillä lähes kaikki liimat, lakat ja silikonit sisältävät vähintään muutaman painoprosentin VOC-kemikaaleja. Alustava materiaalitesti ko. materiaalinäytteellä päättyi onnistuneesti. Vaikka edeltävää materiaalia ei valittu DoE 1 -sarjaan, halutaan siitä kuitenkin referenssi kyseiselle sarjalle. Näin ollen Design of Experiments 1 –sarjan rinnalle kytketään 9 näytteen sarja materiaalille R identtisillä muuttujilla (Taulukko 10) kuin DoE 1 -sarjassa poislukien fluksi, jonka läsnäolo tässä sarjassa koetaan tarpeettomaksi.

Taulukko 10: Täydennyssarjan muuttujat

Materiaali	Linssi	LED
R	Lasi	A
	PMMA	B
	PC	C

Taulukossa 11 on esitetty täydennyssarja näytekohtaisesti. Sarjan näyte koko on rajattu suppeaksi, mutta riittäväksi määrittämään VOC-yhdisteiden roolia vikaantumisessa. Näytteet ovat sijoitettu LED-kohtaisesti niille määritettyihin säilytyslokeroihin samoin kuin DoE 1 -sarjassa.

Taulukko 11: Täydennyssarja materiaalinäytteelle R.

Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi
5:1	R	Lasi	A	n
5:2	R	PMMA	A	n
5:3	R	PC	A	n
5:4	R	Lasi	B	n
5:5	R	PMMA	B	n
5:6	R	PC	B	n
5:7	R	Lasi	C	n
5:8	R	PMMA	C	n
5:9	R	PC	C	n

Täydennyssarjan näytemerkinnän ensimmäinen numero (5) edustaa sarjan tunnusta ja juokseva numerointi näytteitä.

7.3 Tulosten analysointi

Tässä kappaleessa analysoidaan DoE 1 –sarjan tulokset käyttäen hyväksi tilastohallintaohjelmaa. Kappaleen lukuarvot ovat pienimmän neliösumman keskiarvoja näytteiden valovirran suhteellisesta erotuksesta ennen ja jälkeen testauksen. Käytännössä arvot ovat väliltä 0-100; mitä pienempi arvo on, sitä suurempi rooli kyseisellä muuttujalla tai muuttujakombinaatiolla on vikaantumisessa. Vikaantuneet näytteet ovat värjäytyneet lähes poikkeuksetta voimakkaasti LED-komponentin pinnalta niin kuin kappaleessa 4.2 on kuvattu. Taulukossa 12 on esitetty vikaantuneiden ja ei-vikaantuneiden näytteiden määrät alasarjoittain. LED-valmistajat ilmoittavat, että komponentit voivat menettää ns. luonnollisesti valovirrastaan 3% 350 mA:n virralla. Valmistajilla ei ole tietoa vastaavasta arvosta 700 mA:n virralla. Täten näyte tulkitaan vikaantuneeksi, mikäli sen valovirta on pienentynyt testin aikana $\geq 10\%$ alkuperäisestä arvosta. Alasarjoista X:n ja Y:n ennustettiin menestyvän hyvin, kun taas Z:n sekä W:n heikosti tutkimussarjassa. DoE 1-sarjan vikaantuneista näytteistä kootaan 10 näytteen sarja. Tälle sarjalle suoritetaan toipumistesti kappaleessa 7.3.4.

Taulukon 12 arvoista voidaan päätellä, että DoE 1 –sarja päättyi ennustetusti sisältäen vikaantuneita näytteitä ainoastaan alasarjoissa Z ja W. Tämä viittaa siihen, että merkittävin vikaantumiseen liittyvä muuttuja on materiaalinäyte.

Taulukko 12: Näytteiden menestys alasarjoittain.

Alasarja	OK näyte [kpl]	Vikaantunut näyte [kpl]
X	36	0
Y	36	0
Z	12	24
W	5	31

7.3.1 Muuttujien vaikutus vikaantumisessa

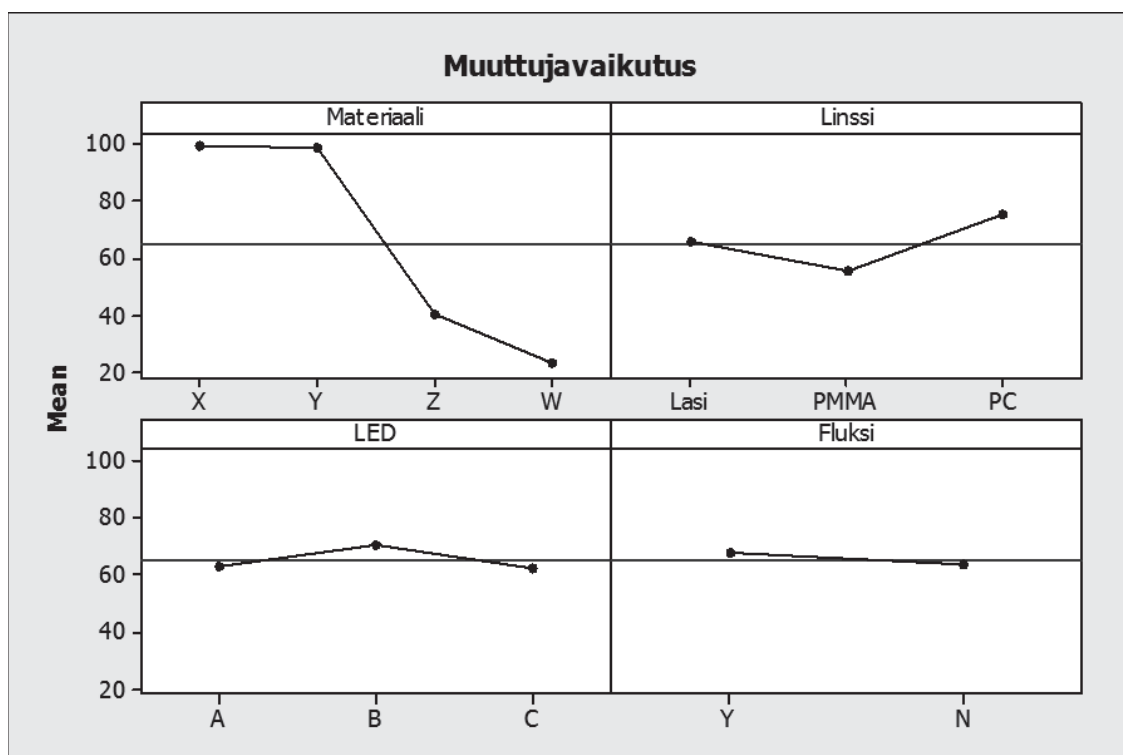
Taulukossa 13 on esitetty muuttujien vaikutus vikaantumiseen. Numeeriset arvot ovat määritetty tilastohallintaohjelmalla, johon on syötetty testauksen loputtua valovirtojen erotusten suhteet näytekohtaisesti ennen ja jälkeen testauksen.

Taulukko 13: Muuttujien vaikutus näytteiden vikaantumisessa

		Neliösumman keskiarvo
Materiaali	X	99,16
	Y	98,85
	Z	40,35
	W	23,28
Linssi	Lasi	65,69
	PMMA	55,21
	PC	75,33
LED	A	63,3
	B	70,62
	C	62,31
Fluksi	y	67,47
	n	63,35

Materiaalimuuttujat Z ja W vaikuttavat taulukon arvojen mukaan voimakkaasti vikaantumiseen. Materiaali W:n vaikutus on jopa tuplasti suurempi kuin materiaali Z:n. Näitä arvoja suhteuttamalla koko taulukon arvoihin voidaan todeta, että materiaalimuuttujalla on ehdottomasti suurin rooli näytteiden vikaantumisessa. Taulukon 13 tiedot on esitetty graafisesti kuvassa 16.

Linssimuuttujista PMMA on huomattavasti useammassa näytteessä osallinen vikaantumiseen kuin PC- ja lasilinssi. Lämpömittausten mukaan testit suoritetaan selvästi alle kaikkien materiaalien lasisiirtymälämpötilan alapuolella. Linssimateriaalit ovat näin ollen diffuusiolle inertejä kyseisessä ympäristössä. Linseistä mahdollisesti haihtuvien partikkelien määrittäminen ei ole mahdollista rajallisten resurssien myötä. PMMA:n suhteellisen suuri rooli vikaantumisessa on selitettävissä sillä, että linssin alla oleva ilmatilavuus on pienin verrattuna PC- ja lasilinssiin. Tästä syystä lämpötila ja paine ovat hieman korkeammat sekundäärilinssin alla. PMMA-linssin tiivistys on myöskin helpointa ja varmintä, koska piirikortin ja linssin välinen rajapinta on pinta-alaltaan suurin. PC-linssin tiivistys on haastavinta sen geometrian takia ja siksi rajapinnan tiiveys on kyseenalainen. Mahdolliset ilmavuodot vähentävät vikaantumistodennäköisyyttä PC-linssin sisältävissä näytteissä. Myös lasilinssin kohdalla tiivistysrajapinnan laadussa on puutteita; rajapinta oli usean linssin kohdalla kalteva tai epätasainen. Nämä seikat vaikeuttavat tiiviin rajapinnan muodostamista.



Kuva 16: Graafinen esitys muuttujien vaikutuksesta vikaantumiseen

LED-komponenteista LED C:llä ja A:lla on lähes yhtä suuret neliösummien keskiarvot. LED B on osoittanut testissä hieman suurempaa vikaantumisensietokykyä. Syy tähän eroon on melko todennäköisesti selitettävissä komponenttien rakenne-eroilla. Esimerkiksi kullakin komponentilla on valmistajakohtainen siloksaanipohjainen primäärilissi ja puolijohdemateriaaliseos, joiden alttiut kaasujen diffuusiolle ja kemiallisille reaktioille vaihtelee.

Ennusteista poiketen käytetyillä fluksilla ei ollut suurta osuutta vikaantumiseen. Vaikka fluksi sisältää VOC-yhdisteitä, yhdisteiden molekyylirakenne määrittelee niiden diffuusio- ja kemialliset ominaisuudet. Kuvan 16 mukaan fluksi on jopa hieman parantanut vikaantumisensietokykyä. Fluksi on saattanut estää tiiviin rajapinnan muodostuksen sekundäärilinssin ja piirikortin välille, koska fluksia on mahdollisesti jäänyt puristuksiin kahden rajapinnan väliin.

Kappaleen tulokset poissulkevat eräitä potentiaalisia vikaantumistekijöitä. Testilämpötilalla ei ole ollut osuutta vikaantumiseen, vaikka näyttemateriaaleilla on erilaiset lämpöominaisuudet. LED-komponenttien ladonta ei ole myöskään aiheuttanut häiriötekijöitä DoE 1 –sarjassa. Piirikortteja käsiteltiin näytteenteossa kumihansikkain ja niiden alkuperä on identtinen. Tästä syystä piirikorttien epäpuhtauksien laatua ja määrää voidaan pitää vakiona.

7.3.2 Muuttujien yhteisvaikutus vikaantumisessa

Tässä kappaleessa tarkastellaan kahden muuttujakombinaation vaikutusta vikaantumiseen. Ensimmäiseksi tarkastellaan materiaalinäytteen ja linssin yhteisvaikutusta. Yhteisvaikutukset ovat esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14: Materiaalinäytteen ja linssimateriaalin yhteisvaikutus

Materiaali + Linssi	Neliösumman keskiarvo
X + Lasi	98,78
X + PMMA	98,28
X + PC	100,43
Y + Lasi	98,58
Y + PMMA	98,05
Y + PC	99,91
Z + Lasi	55,42
Z + PMMA	23,17
Z + PC	42,48
W + Lasi	10
W + PMMA	1,35
W + PC	58,49

X- ja Y-materiaalin osalta tulosten suhteelliset erot osuvat virhemarginaalin sisälle eikä näiden materiaalien ja linssien yhteisvaikutuksilla ole huomattavaa eroa. W-materiaalin ja PMMA-linssin yhdistelmä on käytännössä vikaannuttanut kaikki kyseisen kombinaation sisältämät näytteet.

Materiaalinäytteen ja LED-komponentin yhteisvaikutuksissa ei havaita juurikaan edellisestä poikkeavia havaintoja (taulukko 15). X- ja Y-materiaalin kohdalla LEDien yhteisvaikutukset ovat erittäin vähäisiä. Huomiota herättävin seikka on W-materiaalin ja LED B:n yhteinen vaikutus. Komponentti sietää yli kolminkertaisesti paremmin vikaantumista kuin LED A ja C kyseisen materiaalin kohdalla. Tähän on todennäköisesti syynä LED B:n suotuisampi rakenne yhdessä W-materiaalin kanssa.

Taulukko 15: Materiaalinäytteen ja LED-komponentin yhteisvaikutus

Materiaali + LED	Neliösumman keskiarvo
X+A	102,48
X+B	96,86
X+C	98,15
Y+A	102,35
Y+B	96,31
Y+C	97,88
Z+A	35,2
Z+B	49,7
Z+C	36,16
W+A	13,18
W+B	39,61
W+C	17,05

Taulukossa 16 on esitetty materiaalinäytteen ja fluksin yhteisvaikutus DoE 1 –sarjassa. Muuttujajhdistelmä ei aiheuta merkittävää tulosten hajontaa.

Taulukko 16: Materiaalinäytteen ja fluksin yhteisvaikutus

Materiaali + Fluksi	Neliösumman keskiarvo
X + Y	98,91
X + N	99,41
Y + Y	99,09
Y + N	98,61
Z + Y	47,08
Z + N	33,63
W + Y	24,81
W + N	21,75

Taulukossa 17 on esitetty linssimateriaalin ja LED-komponentin yhteisvaikutus. PMMA-linssin ja LED C:n kombinaatiosta näyte vikaantuu noin kymmenyksen herkemmin kuin PMMA-linssin ja LED A:n kombinaatiossa. LED C todettiin heikoimmaksi komponentiksi vikaantumisen osalta. PC-linssin kohdalla LED B osoittaa ylivoimaisuutensa.

Taulukko 17: Linssimateriaalin ja LED-komponentin yhteisvaikutus

Linssi + LED	Neliösumman keskiarvo
Lasi+A	64,26
Lasi+B	69,01
Lasi+C	63,82
PMMA+A	62,6
PMMA+B	54,31
PMMA+C	48,72
PC+A	63,05
PC+B	88,54
PC+C	74,39

Linssimateriaalin ja fluksin yhdistelmä ei aiheuta merkittävää hajontaa tuloksissa. (taulukko 18).

Taulukko 18: Linssimateriaalin ja fluksin yhteisvaikutus

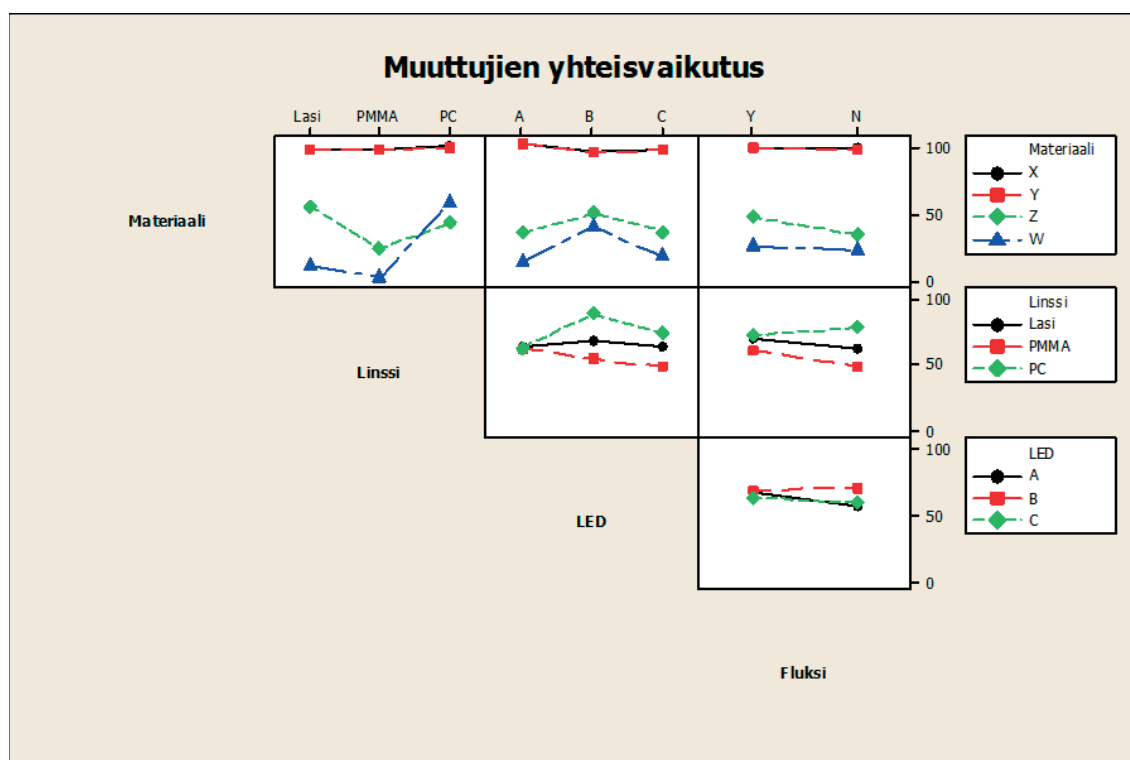
Linssi + Fluksi	Neliösumman keskiarvo
Lasi + Y	69,24
Lasi + N	62,14
PMMA + Y	60,78
PMMA + N	49,64
PC + Y	72,4
PC + N	78,26

Taulukossa 19 esitetään LED-komponentin ja fluksin yhteisvaikutus. LED A:n kohdalla fluksi muodostaa noin kymmenyksen eron fluksittomaan arvoon. Ilmiö on selitetty edellä.

Taulukko 19: LED-komponentin ja fluksin yhteisvaikutus

LED + Fluksi	Neliösumman keskiarvo
A+Y	68,15
A+N	58,45
B+Y	69,89
B+N	71,35
C+Y	64,38
C+N	60,24

Taulukoiden 14-19 arvot on esitetty graafisesti kuvassa 17.



Kuva 17: Graafinen esitys muuttujien yhteisvaikutuksista

Kuvasta 17 havaitaan, että materiaalinäyte yhdessä muiden muuttujien kanssa muodostaa suurimmat hajonnat tuloksissa.

7.3.3 Täydennyssarja

Kappaleessa 7.2 määritettiin DoE 1 -sarjalle 9:n näytteen täydennyssarja materiaalille R. Sarjan tarkoituksena oli muodostaa referenssisarja DoE 1 -sarjalle. Täydennyssarjan kaikki 9 näytettä läpäisivät testauksen. Näytteiden valovirrasta oli testauksen jälkeen jäljellä keskimäärin 98,3%. Materiaali R sisältää valmistajan mukaan 0,00%:a VOC-yhdisteitä, ts. ei lainkaan hiilipitoisia molekyylejä. Täydennyssarjan tulokset tukevat DoE 1 -sarjasta saatuja tuloksia.

7.3.4 Toipumistesti

DoE 1 –sarjassa vikaantuneista näytteistä koottiin 10 näytteen otos, joille suoritettiin toipumistesti. Sekundäärilinsseihin porattiin 2 mm reikä, jotta näyte menettäisi hermeettisen rakenteensa. Tämän jälkeen näytteet kytkettiin takaisin 700mA:n virtaan ja aktivoitiin noin 330 tunniksi. Ajanjakson jälkeen näytteiden valovirrat määritettiin. Taulukkoon 20 on kirjattu toipumistestin tulokset.

Taulukko 20: Toipumistestin tulokset

Näyte	Alasarja	LED	Alkuperäinen [lm]	Vikaantunut [lm]	Toipunut [lm]	Toipunut/Alkuperäinen
1	W	B	84,16	1,21	71,23	84,64 %
2	Z	B	75,58	3,67	47,24	62,50 %
3	Z	B	82,07	0	68,25	83,16 %
4	Z	C	88,95	1,47	84,4	94,88 %
5	W	C	91,6	0,24	38,99	42,57 %
6	Z	C	90,92	0,02	84,86	93,33 %
7	Z	C	94,02	0,16	81,46	86,64 %
8	Z	C	89,05	0,18	73,06	82,04 %
9	Z	A	67,71	4,13	32,61	48,16 %
10	W	A	76,81	0,24	11,8	15,36 %

Taulukosta 20 havaitaan, että LED A –komponentit ovat toipuneet keskimäärin 31,8%, LED B –komponentit 76,8% ja LED C –komponentit 79,9% alkuperäiseen valovirtaan verrattuna. Rajallisen otoksen myötä tuloksista ei voida päätellä mikä komponentti toipuu tehokkaimmin, mutta voidaan todeta, että kaikissa komponenteissa toipumista on havaittavissa. Huomattava toipuminen on havaittavissa näytteessä numero 3; täysin ”kuollut” komponentti toipui jopa 83%:iin alkuperäisestä valovirran arvosta. Toipumisilmiö saattaa osoittaa, että vikaantumisreaktio on mahdollisesti LED-komponentin rakenteeseen liittyvä hapetus-pelkistys –reaktio. Toipumistesti osoittaa sen, että komponentin vikaantuminen ei ole täysin peruuttamaton ilmiö. Toipuminen todennäköisesti jatkuisi ylitettyään 330 tunnin ajanjakson.

7.3.5 Vikaantuneiden näytteiden sähköteho

DoE 1 –sarjassa vikaantuneista näytteistä halutaan selvittää, ovatko näytteiden sähköiset ominaisuudet muuttuneet ja onko muutoksilla mahdollisesti osuutta vikaantumiseen. Vikaantuneet näytteet kytketään 350 mA:n virtaan, jonka jälkeen näytteiden kynnysjännitteet mitataan ja kirjataan ylös. Mittausarvoista määritetään komponenttien sähköteho. Tämän jälkeen tehoarvoja verrataan uusien, käyttämättömien komponenttien arvoihin (taulukko 21).

Taulukko 21: Vikaantuneiden komponenttien sähkötehon vertailu käyttämättömiin komponentteihin.

LED	Käyttämätön			Vikaantunut		
	U [V]	I [mA]	P [W]	U [V]	I [mA]	P [W]
A	2,9	350	1,02	3	350	1,05
B	3,17	350	1,11	3,08	350	1,08
C	2,84	350	0,99	2,81	350	0,98

Taulukosta 21 havaitaan, että vikaantuneen komponentin sähköteho on mittavirherajat huomioiden käytännössä identtinen kuin käyttämättömällä komponentilla, vaikka valoteho on saattanut laskea yli 95%. Energian säilymislain mukaan sähköenergian on muututtava vikaantuneessa komponentissa muuksi energiamuodoksi kuin fotoneiksi. Kyseisessä tapauksessa komponentin lämpöenergia kasvaa, koska jokin ilmiö estää fotonien emission. Komponentin kohonnut lämpöenergian muodostus on eräiden näytteiden kohdalla ilmennyt LED-sirussa ns. ”palovammoina”. Sirun pinta on pinnoittunut ruskeaksi tai mustaksi asti ja pinnan kiinteä rakenne on muuttunut pehmeästä hauraaksi. Eräissä näytteissä jopa primäärilinssi on osoittanut sulamisen merkkejä. Kyseinen ilmiö on näin ollen seuraus vikaantumisesta. Sähkötehon vertailu suoritettiin, koska tarkoituksena oli poissulkea sähköisten muuttujien rooli vikaantumisessa. Voidaan todeta, että komponentti toimii sähköisesti tarkoituksenmukaisella tavalla ja fotoniemission laskun syy piilee komponentin ja ympäristön rajapinnassa.

7.3.6 Upotustesti

Upotustesti suoritetaan materiaaleille X, Y ja R, jotka osoittautuivat turvallisiksi materiaaleiksi DoE 1 –sarjassa. Upotustesti suoritetaan IP67-luokituksen todentamiseksi. Sekundäärilinsseihin kiinnitetään veden indikaattoritarrat, joka ei reagoi ilmankosteuden kanssa, mutta vaihtaa väriään valkoisesta punaiseksi suoran vesikosketuksen seurauksena. Sekundäärilinsit kiinnitetään vesitiiviisti piirikorttiin materiaaleilla X, Y ja R. Tämän jälkeen upotusnäytteet sijoitetaan metrin syvyiseen vesisäiliöön ½ tunniksi. Upotuksen jälkeen näytteiden indikaattoritarrat tarkastetaan mahdollisen vesikosketuksen varalta.

Upotustestin jälkeen näytteiden indikaattoritarroissa ei havaittu merkkejä vesikosketuksesta. Näin ollen voidaan todeta, että materiaaleilla X, Y ja R voidaan luoda IP-67 luokituksen mukainen rakenne.

8 DESIGN OF EXPERIMENTS 2

Design of Experiments 2 –sarjassa tutkitaan lämpötilan, primäärilinssin (kapselointiaine), loisteaineen ja värillisen LED-komponentin vaikutusta vikaantumiseen. Sarjan koko on 37 näytettä. Tilastollisen virheen pienentämiseksi 37 näytteen sarja sisältää 3 identtistä versiota kustakin yksittäisestä näytetyypistä poislukien väritutkimuksen näytteet. Ensimmäisessä DoE-sarjassa identtisiä näytetyyppejä oli 2, joten DoE 2 –sarja on tilastollisesti luotettavampi.

8.1 Suunnittelu

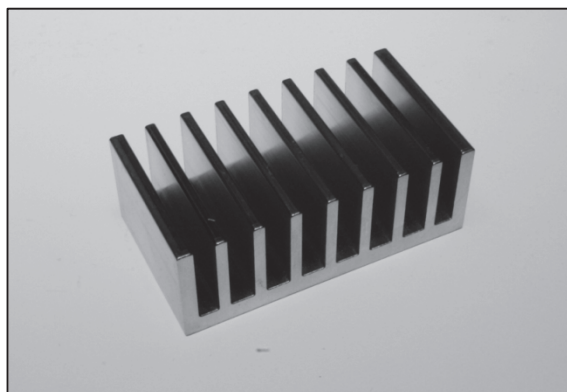
Design of Experiments 2 on jatkoa ensimmäiselle sarjalle. Sarjan tarkoituksena on paikantaa näytteistä DoE 1 –sarjassa havaittu vikaantuminen. Kyseiseen sarjaan valitaan näytteet ensimmäisestä DoE-sarjasta siten, että molemmat yksilöt näyteparista (A ja B) ovat vikaantunut lähes täysin noin 300h testauksen jälkeen. DoE 2 -sarjan näytteet sisältävät samat muuttujat kuin ensimmäinen DoE-sarja. Fluksi-muuttujan sisältäviä näytteitä ei edeltävän valintaperusteen takia liitetä DoE 2 –sarjaan, koska ne eivät ole vikaantuneet ensimmäisten joukossa. Väritutkimus, poiketen muista tämän kappaleen tutkimuksista, ei liity DoE 1 –sarjan näytteisiin. DoE 2 -sarjan tarkoituksena on yrittää LED-komponenttien modifioinnin myötä estää näytteiden vikaantuminen toistamiseen.

Design of Experiments 2 –sarja koostuu 4:stä eri osasta; lämpö-, primäärilinssi-, loisteaine- ja väritutkimuksesta. Tutkimukset saattavat sisältää samoja näytteitä, vaikka tutkimusten luonteet ja näytteiden modifioinnit poikkeavat toisistaan. Toisin sanoen näytteitä, jotka sisältävät samat muuttujat, voidaan käyttää esimerkiksi sekä lämpö- että loisteainetutkimuksessa. DoE 2-sarja on esitettynä kokonaisuudessaan taulukossa 22; saman numeron sisältävät näytenimikkeet ovat keskenään identtisiä.

Taulukko 22: Design of Experiments 2

	Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi
Lämpönäytteet LED A	1A	Z	PMMA	A	n
	1B	Z	PMMA	A	n
	1C	Z	PMMA	A	n
Lämpönäytteet LED B	2A	Z	PMMA	B	n
	2B	Z	PMMA	B	n
	2C	Z	PMMA	B	n
Lämpönäytteet LED C	3A	W	PMMA	C	n
	3B	W	PMMA	C	n
	3C	W	PMMA	C	n
Lämpönäytteet LED A 350 mA	4A	Z	PMMA	A	n
	4B	Z	PMMA	A	n
	4C	Z	PMMA	A	n
Lämpönäytteet LED B 350 mA	5A	Z	PMMA	B	n
	5B	Z	PMMA	B	n
	5C	Z	PMMA	B	n
Lämpönäytteet LED C 350 mA	6A	Z	PMMA	C	n
	6B	Z	PMMA	C	n
	6C	Z	PMMA	C	n
Primäärilinssinäytteet LED A	7A	Z	PC	A	n
	7B	Z	PC	A	n
	7C	Z	PC	A	n
Primäärilinssinäytteet LED B	8A	W	PMMA	B	n
	8B	W	PMMA	B	n
	8C	W	PMMA	B	n
Primäärilinssinäytteet LED C	9A	W	PC	C	n
	9B	W	PC	C	n
	9C	W	PC	C	n
Loisteainenäytteet LED A	10A	Z	PMMA	A	n
	10B	Z	PMMA	A	n
	10C	Z	PMMA	A	n
Loisteainenäytteet LED B	11A	Z	PMMA	B	n
	11B	Z	PMMA	B	n
	11C	Z	PMMA	B	n
Värinäytteet LED B	12	Z	PMMA	LED B pun.	n
	13	W	PMMA	LED B pun.	n
	14	Z	PMMA	LED B vihr.	n
	15	W	PMMA	LED B vihr.	n

Lämpötutkimuksessa kaikki näytteet sijoitetaan kannettomaan lokerikkoon ja 9:ään näytteeseen kiinnitetään ulkoinen alumiininen jäähdytyslementti (kuva 18). Jäähdytyslementti kiinnitetään näytteen piirikorttiin lämpöjohtavalla teipillä.



Kuva 18: Näytteisiin kiinnitettävä alumiininen jäähdytyslementti; mitat: 54x30x20mm, rivan paksuus 2mm, korkeus 16mm.

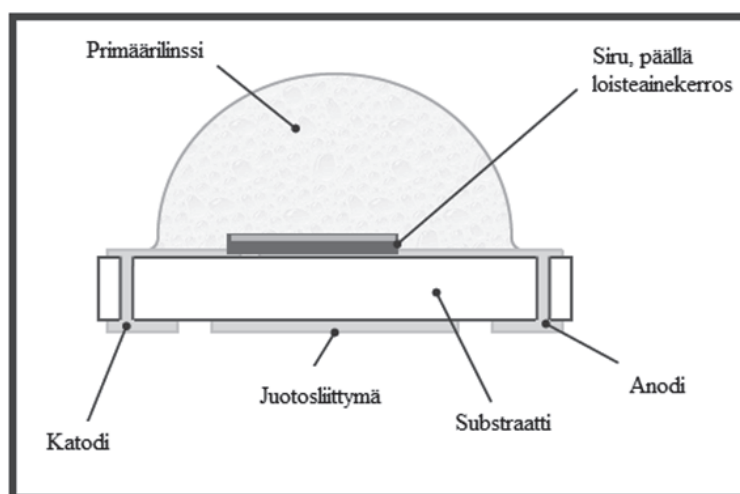
Edeltävien 9 näytteen rinnalle kytketään toinen 9 näytteen sarja 700 mA:n sijaan 350 mA:n testivirtaan. Testivirran puolittaminen koskee siis vain osaa lämpötutkimuksen näytteistä. Tarkoituksena on määrittää vikaantuvatko näytteet mikäli virran arvo puolitetaan. Taulukossa 23 on esitetty virran puolituksen vaikutus LED-komponenttien lämpötilaan. Näytteiden, jotka ovat kytketty 350 mA:n virtaan, jännitteiden arvot ovat pienempiä kuin niiden ollessa kytkettynä 700 mA:n virtaan. Nämä arvot ovat saatavissa komponenttien valmistajilta.

Taulukko 23: Komponenttien lämpötilojen vertailua kannettomassa lokerikossa; 700 mA, jäähdytyslementti ja 350 mA. Linssimateriaalin vaikutus lämpötilaan $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

LED	Komponentin lämpötila kanneton lokerikko [$^{\circ}\text{C}$]	Komponentin lämpötila (Jäähdytyslementti) kanneton lokerikko [$^{\circ}\text{C}$]	Komponentin lämpötila 350 mA [$^{\circ}\text{C}$]
A	73,7	67,8	50,6
B	105,3	91,5	73,4
C	99	87,7	61,3

Lämpötutkimuksen tarkoituksena on selvittää onko DoE 1 -sarjassa tapahtunut näytteiden vikaantuminen mahdollista välttää jos niiden testilämpötilaa madalletaan. Lämpötutkimus sisältää yhteensä 18 näytettä.

Primäärilinssitutkimuksessa näytteistä poistetaan primäärilinssi (kuva 19). Mikäli vikaantuminen tapahtuu primäärilinssin rakenteessa, tulisi tämän toimenpiteen estää vikaantuminen. Primäärilinssi irroitetaan varovasti primäärilinssin ja substraatin rajapinnasta. Näytteet sijoitetaan lokerikkoon samoin kuin DoE 1 -sarjassa; LED A:t suljettuun ja LED B:t sekä C:t avoimeen lokerikkoon. Primäärilinssitutkimus sisältää 9 näytettä.



Kuva 19: Valkoisen LED-komponentin rakenne [Cree Inc. 2011]

Loisteainetutkimuksessa näytteistä poistetaan sekä primäärilinssi että LED-sirun päällä oleva loisteainekerros (kuva 19). Tutkimuksen tarkoituksena on määrittää loisteaineen rooli vikaantumisessa. Ensimmäisessä DoE-sarjassa useat vikaantuneet näytteet ovat muuttuneet väriltään sinisiksi. Sama ilmiö tapahtuu LED-komponentissa, kun loisteainekerroksen poistaa LEDin rakenteesta. Aikaisemmin on todettu, että loisteaine on välttämätön komponentti valkoisen LEDin luomiselle. Vikaantuneen sinistä väriä emittoivan LEDin tapauksessa on syytä olettaa, ettei loisteainekerros toimi sovelluksessa tarkoituksenmukaisella tavalla. Loisteainetutkimus koostuu 6:sta näytteestä 9 sijaan, koska LED C:stä ei ole mahdollista irrottaa loisteainekerrosta vahingoittamatta sirun puolijohdemateriaalia. Tästä johtuen kyseinen komponentti jätettiin loisteainetutkimuksen ulkopuolelle. Näytteet sijoitetaan lokerikkoon samoin kuin primäärilinssitutkimuksessa.

Väritutkimuksessa tutkitaan onko vikaantuminen mahdollista eri aallonpituutta emittoivilla komponenteilla. Näillä komponenteilla on myös erilainen komponenttirakenne. Loisteominaisuus on integroitu LED-siruun, toisin kuin keltaista väriä emittoivilla komponenteilla, joissa loisteaine on erillinen komponentti sirun päällä. Punaisen LED-komponentin puolijohdemateriaalina käytetään alumiini-indium-gallium-fosfidia ja vihreässä komponentissa indium-gallium-nitridiä. Tutkimuksessa näytteisiin asennetaan vihreitä ja punaisia LED-komponentteja pitäen muut muuttujat ennallaan. Tutkimus sisältää 4 näytettä, joihin juotetaan 2 vihreää ja 2 punaista LED B -komponenttia. Näytteet sijoitetaan avonaiseen lokerikkoon.

8.2 Tulosten analysointi

Tässä kappaleessa käydään läpi Design of Experiments 2 –sarjan tulokset tutkimuskohtaisesti; järjestyksessä lämpö-, primäärilinssi-, loisteaine- ja väritutkimus.

8.2.1 Lämpötutkimus

Lämpötutkimuksen tulokset ovat esitetty taulukoissa 24 ja 25. Jäähdytyslementin sisältäneistä 9:stä näytteestä 6 läpäisi testin. DoE 1 -sarjassa kaikki vastaavat näytteet vikaantuivat. LED B:n kohdalla kaikki näytteet säilyivät toimintakykyisinä, kun taas LED A:n kohdalla kaksi näytettä vikaantui menettäen yli 10% alkuperäisestä valovirrastaan. Voidaan todeta, että jäähdytyslementillä oli yllättävän suotuista vaikutus vikaantumisen estämiseen.

Taulukko 24: Lämpötutkimuksen tulokset; jäähdytyslementti.

	Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi	Alussa [lm]	Lopussa [lm]	%
Lämpönäytteet LED A	1A	Z	PMMA	LED A	n	76,92	71,33	92,73
	1B	Z	PMMA	LED A	n	77,09	68,45	88,79
	1C	Z	PMMA	LED A	n	81,13	0,92	1,13
Lämpönäytteet LED B	2A	Z	PMMA	LED B	n	91,97	88,89	96,65
	2B	Z	PMMA	LED B	n	93,35	86,17	92,31
	2C	Z	PMMA	LED B	n	93,02	88,92	95,59
Lämpönäytteet LED C	3A	W	PMMA	LED C	n	95,09	82,45	86,71
	3B	W	PMMA	LED C	n	99,49	97,18	97,68
	3C	W	PMMA	LED C	n	92,57	95,24	100

Näytteiden, joita ajettiin testauksen aikana 350 mA:n virralla, vikaantumisaste oli yllättäen korkeampi kuin jäähdytyslementtitutkimuksen kohdalla, vaikka sovelluksen lämpötila on huomattavasti alhaisempi. Neljä näytettä yhdeksästä läpäisi testauksen, joista kolme sisälsi LED A –komponentin. Tuloksista ei voida päätellä, että vikaantumisen takana oleva kemiallinen reaktio olisi aktiivisin tietyillä lämpötila-alueilla ja yhtä kynnyslämpötilaa ei ole olemassa vikaantumisreaktion aktivoitumiseksi. Tilastollinen häiriö, ts. näytteiden vähäinen lukumäärä, on todennäköisesti havainnon takana.

Taulukon 23 mukaan, ajettaessa komponenttia 350 mA:n viralla, vikaantuminen on mahdollista jopa 61,3°C:sen lämpötilassa LED C:n kohdalla. LED A:n sisältäneistä näytteistä yksikään ei vikaantunut 50,6°C:sen lämpötilassa, mutta toimintavarmuutta ei voida taata kyseisessä lämpötilassa laajan otosvaruuden puuttuessa.

Taulukko 25: Lämpötutkimuksen tulokset; 350 mA.

	Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi	Alussa [lm]	Lopussa [lm]	%
Lämpönäytteet LED A 350 mA	4A	Z	PMMA	LED A	n	76,18	72,57	95,26
	4B	Z	PMMA	LED A	n	82,82	78,39	94,65
	4C	Z	PMMA	LED A	n	81,59	75,43	92,45
Lämpönäytteet LED B 350 mA	5A	Z	PMMA	LED B	n	94,6	80,31	84,89
	5B	Z	PMMA	LED B	n	93,61	2,9	3,10
	5C	Z	PMMA	LED B	n	93,37	83,49	89,42
Lämpönäytteet LED C 350 mA	6A	Z	PMMA	LED C	n	105,45	3,1	2,94
	6B	Z	PMMA	LED C	n	96,34	89,32	92,71
	6C	Z	PMMA	LED C	n	101,38	83,72	82,58

Lämpötutkimuksen tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että lämpöenergialla on vikaantumisen käynnistävä ja mahdollisesti kiihdyttävä vaikutus. Mitä alhaisemmassa lämpötilassa LED-sovellus on aktiivisena, sitä epätodennäköisempää vikaantuminen on. On myös syytä ottaa huomioon, että vikaantumisreaktio voi lämpötilan alentuessa pitkittyä eikä reaktiota havaita 1 000h ajanjakson aikana.

8.2.2 Primäärilinssitutkimus

Primäärilinssitutkimuksen tulokset ovat esitetty taulukossa 26. Taulukosta havaitaan, että kaikki näytteet ovat läpäisseet testauksen. Primäärilinssi muodostaa rakenteessa eräänlaisen mikroatmosfäärin. Kyseisessä ympäristössä vallitsee korkeampi paine ja lämpötila kuin sekundäärilissin ympäröimässä rakenteessa. Myös loisteainekerrokseen kohdistuvat diffuusiota ajavat voimat kasvavat primäärilinssin alla.

Taulukko 26: Primäärilinssitutkimuksen tulokset.

	Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi	Alussa [lm]	Lopussa [lm]	%
Primäärilinssinäytteet LED A	7A	Z	PC	LED A	n	62,09	62,42	100,00
	7B	Z	PC	LED A	n	61,74	59,23	95,93
	7C	Z	PC	LED A	n	60,05	60,69	100,00
Primäärilinssinäytteet LED B	8A	W	PMMA	LED B	n	52,41	62,43	100,00
	8B	W	PMMA	LED B	n	73,62	70,2	95,35
	8C	W	PMMA	LED B	n	57,7	66,96	100,00
Primäärilinssinäytteet LED C	9A	W	PC	LED C	n	90,23	89,62	99,32
	9B	W	PC	LED C	n	88,59	86,74	97,91
	9C	W	PC	LED C	n	93,09	92	98,83

8.2.3 Loisteainetutkimus

Loisteainetutkimuksen tulokset ovat ilmoitettu taulukossa 27. Kaikki 6 näytettä läpäisivät testauksen.

Taulukko 27: Loisteainetutkimuksen tulokset.

	Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi	Alussa [lm]	Lopussa [lm]	%
Loisteainenäytteet LED A	10A	Z	PMMA	LED A	n	66,95	68,06	100,00
	10B	Z	PMMA	LED A	n	65,19	68,64	100,00
	10C	Z	PMMA	LED A	n	61,61	63,84	100,00
Loisteainenäytteet LED B	11A	Z	PMMA	LED B	n	22,14	21,37	96,52
	11B	Z	PMMA	LED B	n	39,81	38,87	97,64
	11C	Z	PMMA	LED B	n	14,3	13,92	97,34

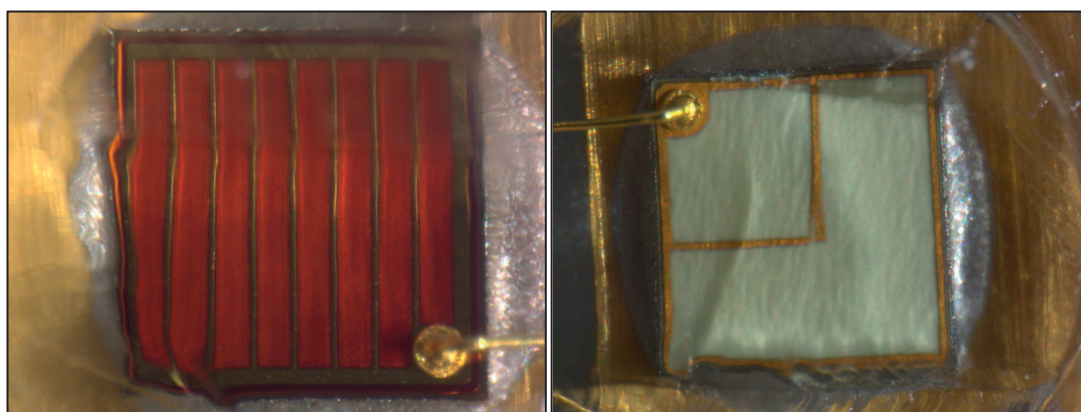
8.2.4 Väritutkimus

Väritutkimuksessa (taulukko 28) kaikki 4 näytettä läpäisivät odotetusti testauksen.

Taulukko 28: Väritutkimuksen tulokset.

	Näyte	Materiaali	Linssi	LED	Fluksi	Alussa [lm]	Lopussa [lm]	%
Värinäytteet LED B	12	Z	PMMA	LED B pun.	n	37,08	36,26	97,79
	13	W	PMMA	LED B pun.	n	38,99	39,95	100,00
	14	Z	PMMA	LED B vihr.	n	75,41	72,55	96,21
	15	W	PMMA	LED B vihr.	n	73,95	72,02	97,39

Kuvasarjassa 20 on esitetty punaisen ja vihreän LED B –komponentin makroskooppikuvat. Komponenteista on poistettu primäärilinssi.



Kuvasarja 20: Makroskooppikuvat; vasemmalla punainen LED B, oikealla vihreä LED B.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Design of Experiments 1 –sarjan tuloksista selvisi, että materiaalimuuttuja on kriittisin tekijä LED-komponentin vikaantumisessa. Materiaaleista Z ja W osoittautuivat hyvin vahingolliseksi LED-sovelluksen toiminnan kannalta. Materiaalit X, Y ja R osoittautuivat turvallisiksi sovelluksessa.

Design of Experiments 2 -lämpötutkimuksessa havaittiin vikaantumisen tapahtuvan myös suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa LED-komponentin lämpötilan ollessa vain noin 60°C. Tämän tutkimusprojektin tuloksien mukaan LED-sovelluksen rakenne on mahdollista valmistaa turvallisesti IP 67-luokituksen mukaiseksi materiaaleilla X, Y ja R.

9.1 Yhteenveto

Tässä kappaleessa kootaan yhteen havainnot, johtopäätökset ja suositukset LED-komponenttien vikaantumiseen liittyen. LED-komponentin vikaantuminen liittyy vieraaseen materiaaliin, jolla sekundäärilinssi kiinnitetään piirikorttiin komponentin päälle. Syntyvä hermeettinen rakenne on avainasemassa vikaantumisreaktion aktivoitumisessa. Lämpöenergia käynnistää ja mahdollisesti kiihdyttää vikaantumisreaktiota johtaen komponentin valovirran menetykseen ja liitoslämpötilan korkeaan kasvuun. Sähköiset ominaisuudet eivät muutu vikaantuneessa komponentissa, sillä sähkötehon arvo pysyy käytännössä samana kuin toimivan komponentin.

Kun hermeettinen rakenne poistetaan vikaantuneen komponentin ympäriltä, toipuu sen valovirta tiettyyn pisteeseen asti. Reaktio vaikuttaa hapetus-pelkistys –reaktiolta, jonka aiheuttaa lisääntynyt hapen määrä ja rakenteen viilentyminen tiiviin rakenteen poiston seurauksena.

Näytemateriaaleja tutkittaessa selkein ero turvallisten ja komponentin vikaannuttaneiden materiaalien välillä oli hiilipitoisuus. Tästä syystä on luonnollista suositella sekundäärilinssin kiinnitykseen adhessiiveja, jotka ovat rakenteeltaan hiilettömiä. Tutkimuksen perusteella näin voidaan turvallisesti luoda hermeettinen rakenne ilman komponentin vikaantumisen vaaraa.

Tutkimuksen loppupuolella muodostettiin vikaantumisteoria, joka liittyy LED-komponentin rakenteessa tapahtuvaan kemialliseen reaktioon. Teoria perustuu erään LED-komponentin osan kiinteän tilan valmistusreaktioon, jonka aikana on havaittu samat ilmiöt kuin komponentin vikaantumisprosessin aikana. Teoria tukee komponentin toipumisessa havaittua hapetus-pelkistys –reaktiota. Lähes kaikki vikaantuneet näytteet

ovat siirtyneet emissiospektrissä alkuperäisen keltaisen sijaan siniselle alueelle. Vastaava sinisen aallonpituuden siirtymä sisältyy myös muodostettuun teoriaan. Vikaantumisteoriassa adhessiivin sisältämällä hiilellä on vikaantumisen käynnistävä vaikutus.

LÄHTEET

LEDiL Oy. 2012

Masui H, Nakamura S, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, White Light-emitting Diodes, Elsevier, 25.01.2010, viitattu 02.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

London South Bank University, Blended Learning Centre, Faculty of Business, 2011, viitattu 03.04.2012, saatavilla: <http://www.blc.lsbu.ac.uk/webcreatif/BES/lighting-4/T4-7.html>

Žukauskas Artūras, Shur Michael S., Gaska Remis, Introduction to Solid-state Lighting, 2002, New York. John Wiley & Sons Inc, viitattu: 18.04.2012, saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100001.pdf>

Abdullah Rafid A, Ibrahim Kamarulazizi, Enhancing MQW violet InGaN laser diode characteristics with a quaternary $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ blocking layer, University of Mosul, Science College, Mosul, Iraq, School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia, 2012, viitattu 16.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402611006863>

Roedel R.J. Light Emitting Diodes, Arizona State University, Tempe, Arizona, USA, Available online 1 January 2003, viitattu 13.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526007853#a0005>

Chichibu S.F, Uedono A, Onuma T, Origin of defect-insensitive emission probability in In-containing (Al,In,Ga)N alloy semiconductors, 2006.

Hashimoto T, Wu F, Speck J.S, Nakamura S, A GaN bulk crystal with improved structural quality grown by the ammonothermal method, 2007, viitattu 05.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Schubert F.E, Light-emitting Diodes, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge 2006, viitattu 05.04.2012.

Narukawa Y, Sano M, Sakamoto T, Yamada T, Mukai T, Successful fabrication of white light emitting diodes by using extremely high external quantum efficiency blue chips, *Phys. Status Solidi A*, 2008, viitattu 10.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Niki I, Narukawa Y, Morita D, White LEDs for solid state lighting, 2004, viitattu 10.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Xie R-J, Hirosaki N, Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs – a review, *Sci. Technol. Adv. Mater*, 2007, viitattu 10.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Narukawa Y, Narita J, Sakamoto T, Recent progress of high efficiency white LEDs, *Phys. Status Solidi A*, 2007, viitattu 10.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Morita Y, Tajima S, Suzuki H, Sugino H, Cationic copolymerization of epoxy siloxane monomer with liquid poly-butadiene and its light emitting diode encapsulation, *J. Appl. Polym. Sci*, 2008, viitattu 11.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Chujo Y, Saegusa T, Organic polymer hybrids with silica gel formed by means of the sol–gel method, *Adv. Polym. Sci*, 1992, viitattu 11.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Okuno A, High reliability, high density, low cost, packaging systems for matrix BGA and CSP using VPES (vacuum White Light-emitting Diodes printing encapsulation systems), *Electron. Compon. Technol. Conf*, 1998, viitattu 12.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Steigerwald D.A, Bhat J.C, Collins D, Illumination with solid state lighting technology, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2002, viitattu 12.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Zweben C, Emerging low cost LED thermal management materials. In: Ferguson I T, Narendran N, DenBaars S P, Carrano J C (eds.) *Proc. SPIE: Fourth Internat. Conf. Solid State Lighting*, 2004, viitattu 12.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Jahkonen, Jaana, LED-valaisimen jäähdytys, Diplomityö, Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, Teknillinen Korkeakoulu, 2009, viitattu: 17.04.2012, saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100001.pdf>

Accuratus, Aluminum Nitride, AlN Material Characteristics, 2002, viitattu: 13.06.2012, saatavilla: <http://accuratus.com/alumni.html>

Grandusky J.R, Smart J.A, Mendrick M.C, Schowalter L.J, Chen K.X, Schubert E.F, Journal of Crystal Growth, Pseudomorphic growth of thick n-type Al_xGa_{1-x}N layers on low-defect-density bulk AlN substrates for UV LEDapplications, Elsevier, 2009, viitattu: 13.06.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024809000542>

Chapman Christopher L., Lee Seri, Schmidt Bill L, Thermal Performance of an Elliptical Pin Fin Heat Sink. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1994, SEMI-THERM X, Proceedings of 1994 IEEE/CPMT 10th, Sivut: 24-31.

Dong-Kwon Kim, Jin-Kwon Bae, Sung Jin Kim, Comparison of Thermal Performances of Plate-Fin and Pin-Fin Heat Sinks Subject to an Impinging Flow. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2008, viitattu: 23.04.2012, saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100001.pdf>

Sikka Kamal K., Torrance Kenneth E., Scholler C.U., Salanova P.I, Heat Sinks With Fluted and Wavy Plate Fins in Natural and Low-Velocity Forced Convection. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, viitattu: 23.04.2012, saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100001.pdf>

Khan W.A., Culham J.R., Yovanovich M.M, The Role Of Fin Geometry in Heat Sink Performance. J. Electron. Packag, 2006, viitattu: 23.04.2012, saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100001.pdf>

Yang L, Hu J, Jang S, Shi M.W, Thermal design of ceramic packages for high power light-emitting diodes, Semicond. Sci. Technol, 2007, viitattu 12.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Khor K.A, Cheng K.H, Yu L.G, Boey F, Thermal conductivity and dielectric constant of spark plasma sintered aluminum nitride, Mater. Sci. Eng. A, 2003, viitattu 12.04.2012, saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080431529022326>

Cree Inc, Cree Xlamp LEDs Chemical Compatibility, Support Document, 2011, viitattu 24.04.2012, saatavilla:

http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_Chemical_Comp.pdf

Jau-Sheng Wang, Chun-Chin Tsai, Jyun-Sian Liou, Wei-Chih Cheng, Shun-Yuan Huang, Gi-Hung Chang, Wood-Hi Cheng, Mean-time-to-failure evaluations of encapsulation materials for LED package in accelerated thermal tests, Microelectronics Reliability, Elsevier, 2012, viitattu: 24.05.2012, saatavilla:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271411003222>

Montgomery, Douglas C, Design and Analysis of Experiments (7th Edition), John Wiley & Sons, 2009, viitattu: 14.05.2012, saatavilla: <http://www.knovel.com>

EPA, United States Environmental Protection Agency, Volatile Organic Compounds, 2012, viitattu 04.06.2012, saatavilla: <http://www.epa.gov/iaq/voc2.html>



Liite